

**EFEKTIVITAS PENGGUNAAN ANODA
KORBAN PADUAN ALUMINIUM PADA
PELAT BAJA KAPAL AISI E 2512 TERHADAP
LAJU KOROSI DI DALAM MEDIA AIR LAUT**

*EFFECTIVENESS OF USING SACRIFICIAL ANODE OF ALUMINUM
ALLOY FOR SHIP STEEL PLATE OF AISI E 2512 ON CORROSION
RATE IN THE MEDIA OF SEA WATER*



TESIS

**Diajukan sebagai salah satu syarat
untuk memperoleh gelar
Magister Teknik Mesin pada Program Pascasarjana
Universitas Diponegoro**

Disusun Oleh :

**EKO JULIANTO SASONO
L4E 007 007**

**PROGRAM STUDI MAGISTER TEKNIK MESIN
PROGRAM PASCASARJANA
UNIVERSITAS DIPONEGORO SEMARANG
2010**

**EFEKTIVITAS PENGGUNAAN ANODA
KORBAN PADUAN ALUMINIUM PADA
PELAT BAJA KAPAL AISI E 2512 TERHADAP
LAJU KOROSI DI DALAM MEDIA AIR LAUT**



TESIS

**Diajukan sebagai salah satu syarat
untuk memperoleh gelar
Magister Teknik Mesin pada Program Pascasarjana
Universitas Diponegoro**

Disusun Oleh :

**EKO JULIANTO SASONO
L4E 007 007**

**PROGRAM STUDI MAGISTER TEKNIK MESIN
PROGRAM PASCASARJANA
UNIVERSITAS DIPONEGORO SEMARANG
2010**

EFEKTIVITAS PENGGUNAAN ANODA KORBAN PADUAN ALUMINIUM PADA PELAT BAJA KAPAL AISI E 2512 TERHADAP LAJU KOROSI DI DALAM MEDIA AIR LAUT

Disusun oleh:

Eko Julianto Sasono
L4E 007 007

Program Studi Magister Teknik Mesin
Program Pasca Sarjana Universitas Diponegoro Semarang

Menyetujui
Tim Pembimbing

Tanggal, 6 Juli 2010

Ketua

Dr. Ir. A. P. Bayuseno, M. Sc.
NIP. 196205201989021001

Pembimbing

Co. Pembimbing

Dr. Ir. A. P. Bayuseno, M. Sc.
NIP. 196205201989021001

Rusnaldy, ST. MT. Ph. D
NIP. 197005201999031001

EFEKTIVITAS PENGGUNAAN ANODA KORBAN PADUAN ALUMINIUM PADA PELAT BAJA KAPAL AISI E 2512 TERHADAP LAJU KOROSI DI DALAM MEDIA AIR LAUT

Eko Julianto Sasono
L4E 007 007

ABSTRAK

Pelat lambung kapal adalah bagian konstruksi yang pertama kali terkena korosi air laut. Korosi pada pelat lambung kapal mengakibatkan turunnya kekuatan dan umur pakai kapal, sehingga dapat mengurangi jaminan keselamatan muatan barang dan penumpang kapal. Untuk menghindari kerugian yang lebih besar akibat korosi air laut maka diperlukan suatu perlindungan korosi pada pelat lambung kapal.

Sampai saat ini salah satu cara untuk melindungi pelat lambung kapal dari serangan korosi adalah dengan metoda proteksi katodik. Metoda proteksi katodik yang sering dipakai adalah sistim anoda korban. Jenis anoda korban yang digunakan dalam penelitian ini adalah paduan aluminium.

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui efektivitas penggunaan anoda korban paduan aluminium sebagai proteksi katodik pelat lambung kapal dan mengetahui kebutuhan anoda korban untuk memperlambat laju korosi pelat lambung kapal di dalam media air laut.

Metodologi penelitian ini adalah observasi lapangan dan eksperimen laboratorium. Obyek observasi adalah kapal *general cargo*, yang menjalani reparasi penggantian pelat dan anoda korban. Spesimen uji untuk eksperimen laboratorium adalah pelat baja AISI E 2512, tiga macam produk anoda korban paduan aluminium yang berbeda (produk A, Al= 86,118%, produk B Al=85,097% dan produk C Al=97,665%) dan menggunakan media air laut dengan salinitas 37 ‰.

Hasil perhitungan dari observasi lapangan menunjukkan bahwa anoda korban paduan aluminium yang dipasang pada kapal telah bekerja secara optimal dengan laju korosi rata-rata 0,304 mm/tahun arah vertikal serta 0,327 mm/tahun arah memanjang kapal sehingga telah sesuai dengan standar kelayakan dan memenuhi syarat aman.

Hasil pengujian korosi di laboratorium juga dapat membuktikan bahwa diantara ketiga anoda korban paduan aluminium yang dipasang pada pelat baja kapal AISI E 2512 ternyata yang mempunyai kinerja paling optimal adalah anoda korban paduan aluminium produk C, dengan laju korosi rata-rata pada pelat baja paling rendah yaitu 0,065 mm/tahun.

Dari penelitian ini dapat diketahui bahwa anoda korban paduan aluminium produk C memiliki kinerja yang optimal, dalam arti dapat memperlambat laju korosi pelat baja AISI E 2512 sehingga benar-benar dapat berfungsi sebagai anoda korban.

Kata kunci : Pelat baja kapal, Anoda korban paduan aluminium, Laju korosi

**EFFECTIVENESS OF USING SACRIFICIAL ANODE OF ALUMINUM
ALLOY FOR SHIP STEEL PLATE OF AISI E 2512 ON CORROSION
RATE IN THE MEDIA OF SEA WATER**

Eko Julianto Sasono

L4E 007 007

ABSTRACT

Hull plates are part of construction of the first affected by sea water corrosion. Corrosion of hull plates may decrease the strength and life of the ship, thus reducing the safety program can reduce the load cargo and passenger ships. To avoid greater losses due to sea water corrosion, we need a corrosion protection on the hull plate.

Until now, one way to protect the hull plate from corrosion is cathodic protection method. Cathodic protection method often used is the sacrificial anode system. Sacrificial anode types used in this study is aluminum alloy.

The research aims determine the effectiveness of the use of aluminum alloy as sacrificial anode for cathodic protection of hull plates and knows the needs of sacrificial anode that is used to slow the average rate of corrosion in the hull plates in seawater.

This research method is field observation and laboratory experiments. Object of observation is a general cargo ship, which under replating repairs and replacement of sacrificial anode. Test specimen for experimental laboratory is a steel plate AISI E 2512, three kinds of aluminum alloy sacrificial anode products are different (the product A, Al = 86.118%, the product B Al = 85.097% and the product C Al = 97.665%) and use of sea water media with a salinity of 37 o / oo

The results showed that the aluminum alloy sacrificial anode mounted on the hull plate can work optimally with the corrosion rate of ship hull plates of 0.304 mm/year in the vertical direction and 0.327 mm/year in the longitudinal direction of the ship and in compliance with applicable standards and met the eligibility safe condition

Results of corrosion testing in the laboratory can also prove that among of the three aluminum alloy sacrificial anode mounted on steel plates of AISI E 2512 ships haven is the most optimal performance is the product of aluminum alloy sacrificial anode C, because it has the average corrosion rate of the lowest vessel steel plate at 0.065 mm/year.

From this research it is known that aluminum alloy sacrificial anode product C has the optimal performance, meaning it slows the rate of corrosion of steel plate AISI E 2512 that can truly serve as the sacrificial anode.

Key words: Ship steel plate , Aluminum alloy sacrificial anode, Corrosion rate

PEDOMAN PENGGUNAAN TESIS

Tesis S2 yang tidak dipublikasikan terdaftar dan tersedia di Perpustakaan Universitas Diponegoro, dan terbuka untuk umum dengan ketentuan bahwa hak cipta ada pada pengarang dengan mengikuti aturan HaKI yang berlaku di Universitas Diponegoro. Referensi kepustakaan diperkenankan dicatat, tetapi pengutipan atau peringkasan hanya dilakukan seijin pengarang dan harus disertai dengan kebiasaan ilmiah untuk menyebutkan sumbernya. Memperbanyak atau menebitkan sebagian atau seluruh tesis haruslah seijin Direktur Program Pascasarjana Universitas Diponegoro.

BAB I

PENDAHULUAN

1.1.Latar Belakang

Salah satu sumber kerusakan terbesar pada pelat kapal laut adalah karena korosi air laut. Sampai saat ini penggunaan besi dan baja sebagai bahan utama pembuatan kapal masih dominan. Dari segi biaya dan kekuatan, penggunaan besi dan baja untuk bangunan kapal memang cukup memadai. Tetapi besi dan baja sangat reaktif dan mempunyai kecenderungan yang besar untuk terserang korosi air laut.

Berdasarkan segi konstruksi pada pelat kapal laut, pelat lambung kapal adalah daerah yang pertama kali terkena air laut. Pada daerah lambung ini bagian bawah garis air ataupun daerah atas garis air rentan terkena korosi. Korosi pada pelat lambung kapal dapat mengakibatkan turunnya kekuatan dan umur pakai kapal, mengurangi kecepatan kapal serta mengurangi jaminan keselamatan dan keamanan muatan barang dan penumpang.

Untuk menghindari kerugian lebih besar akibat korosi air laut, maka pelat lambung kapal perlu perlindungan korosi secara berkala.

Sampai saat ini untuk melindungi pelat lambung kapal terhadap korosi air laut masih menggunakan 3 (tiga) cara yaitu menghindari penyebab korosi, perlindungan secara pasif (dengan pengecatan) dan perlindungan secara aktif (dengan metoda *cathodic protection*).

Metoda *cathodic protection* yang digunakan adalah dengan sistim anoda korban (*sacrificial anode*), sedangkan sistim arus tanding (*impressed current*) jarang dipakai (BKI, 2006). Perlindungan dengan anoda korban mempunyai kelebihan diantaranya lebih sederhana, stabil dan biaya perawatan yang lebih rendah (Tsai, 1996). Jenis anoda korban yang banyak digunakan adalah paduan seng dan paduan aluminium (BKI, 2006).

Tersedianya dua jenis anoda korban ini memberikan pilihan bagi para pemakai untuk memakai jenis anoda korban yang sesuai dengan

kebutuhannya. Dasar pemilihan ini seharusnya atas pertimbangan kinerja kedua jenis anoda korban tersebut yang meliputi; massa jenis, potensial proteksi, tegangan dorong, kapasitas dan efisiensi yang dihasilkan (Anggono,2000) sebagaimana yang dapat dilihat pada tabel 1.1 berikut ini:

Tabel 1.1. Dasar Pemilihan anoda korban (BKI,2006)

No.	Sifat	Anoda Korban Paduan Zn	Anoda Korban Paduan Al
1	Massa Jenis (kg/dm ³)	7,50	2,70
2	Potensial, (-V), CSE	1,05	1,10
3	Tegangan Dorong (V)	0,25	0,25
4	Kapasitas (Ah/kg)	780	2700
5	Efisiensi (%)	95	50-95

Anoda korban aluminium mempunyai kelebihan yaitu *reliability* yang lebih lama dan juga mempunyai karakteristik arus dan berat yang lebih ringan dibandingkan dengan anoda korban paduan seng (Tsai, 1996). Dari data di perusahaan dok dan galangan kapal PT. Jasa Marina Indah Semarang, anoda korban paduan aluminium lebih banyak digunakan baik itu untuk proses perbaikan maupun proses pembuatan kapal seperti yang terlihat pada Tabel 1.2 dan Tabel.1.3 di bawah ini.

Tabel 1.2.Jumlah kapal naik dok tahun 2004–2008 di PT. JMI (PT.JMI,2009)

No.	Tahun Reparasi Kapal	Jumlah Reparasi Kapal	Jumlah Kapal yang Memakai Anoda Korban Paduan Zn	Jumlah Kapal yang Memakai Anoda Korban Paduan Al
1	2004	58	19	39
2	2005	51	9	42
3	2006	55	10	45
4	2007	60	10	50
5	2008	70	18	52
Jumlah		294	66	228

Jumlah pembuatan kapal di PT. Jasa Marina Indah (JMI) Semarang, dari tahun 1981 – 2008, yang pada bagian lambung kapalnya menggunakan perlindungan korosi dengan anoda korban paduan seng dan paduan aluminium.

Tabel 1.3. Jumlah Pembangunan Kapal di PT. JMI (PT. JMI, 2009)

Tahun Pembuatan Kapal	Jumlah Pembuatan Kapal di PT. JMI	Jumlah Kapal yang Memakai Anoda Korban Paduan Seng	Jumlah Kapal yang Memakai Anoda Korban Paduan Aluminium
1981 - 2008	56	19	37

Kualitas anoda korban aluminium dapat dipengaruhi oleh komposisi paduan (Tsai, 1996). Ada beberapa anoda korban aluminium yang ada di pasaran pada saat ini yang biasa digunakan di perusahaan dok dan galangan kapal PT. Jasa Marina Indah Semarang, sebagai *cathodic protection* pada lambung kapal, dan diantaranya mempunyai komposisi paduan yang berbeda.

Selain kemampuan anoda korban aluminium yang berbeda-beda karena adanya perbedaan komposisi paduan, adakalanya di lapangan ditemui pelat-pelat lambung kapal yang terserang korosi berat dikarenakan kurangnya kebutuhan berat dan jumlah anoda korban yang dipasang. Serta posisi pemasangan yang kurang tepat. Oleh karena itu pada penelitian ini penulis ingin mengamati tentang kinerja dan kebutuhan pemasangan anoda korban dengan menganalisa beberapa produk paduan aluminium yang berbeda sebagai *cathodic protection* pelat lambung kapal serta pengaruhnya terhadap laju korosi di dalam media air laut.

1.2. Perumusan Masalah

Kemampuan dari anoda korban aluminium sangat tergantung pada komposisi paduannya. Hal ini menyebabkan pihak perusahaan dok dan galangan kapal khususnya PT. Jasa Marina Indah Semarang kesulitan menentukan pilihan yang tepat dalam pemakaian anoda korban tersebut.

Dari beberapa anoda korban aluminium dengan komposisi paduan yang berbeda dan tersedia di pasaran, manakah yang mempunyai kinerja sebagai *cathodic protection* pada pelat lambung kapal paling optimal? Berapa banyak anoda korban aluminium yang dibutuhkan untuk melindungi pelat badan kapal? Apakah keadaan di lapangan, jumlah anoda korban aluminium yang dipasang pada pelat lambung kapal sebagai *cathodic protection* telah memenuhi syarat aman?

1.3. Manfaat Penelitian

Hasil penelitian ini diharapkan dapat bermanfaat bagi industri dok dan galangan kapal dalam menentukan berat dan jumlah kebutuhan anoda korban serta jenis paduannya sebagai perlindungan korosi pada pelat baja lambung kapal dan sumbangan pemikiran yang bermanfaat bagi pengembangan ilmu pengetahuan dan teknologi perkapalan, khususnya dalam masalah perlindungan pelat baja lambung kapal terhadap korosi air laut.

Sedang manfaat bagi perusahaan pelayaran sebagai pengguna, dari hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi bahan pertimbangan atau masukan dalam menentukan pilihan penggunaan produk anoda korban paduan aluminium untuk memperoleh hasil perlindungan yang optimal. Adapun untuk instansi akademik, penelitian ini diharapkan dapat bermanfaat sebagai masukan untuk penelitian-penelitian selanjutnya.

1.4. Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui efektifitas penggunaan anoda korban paduan aluminium yang ada di pasaran, sebagai perlindungan katodik pada pelat lambung kapal. Secara terperinci tujuan penelitian ini adalah :

- a. Menghitung laju korosi pelat baja lambung kapal yang sedang menjalani reparasi di dok dan galangan kapal untuk menentukan efektifitas anoda korban yang terpasang.

- b. Menghitung kebutuhan anoda korban paduan aluminium sebagai perlindungan katodik pelat baja kapal, baik dalam penerapan di lapangan maupun dalam eksperimen laboratorium untuk memenuhi standar kelayakan yang berlaku.
- c. Menghitung laju korosi pelat baja lambung kapal dengan perlindungan katodik menggunakan 3 (tiga) produk anoda korban paduan aluminium, untuk menentukan kinerja anoda korban yang paling optimal di dalam media air laut.

1.5. Pembatasan Masalah

Pembatasan masalah dilakukan agar penelitian yang dilakukan dapat sesuai dengan tujuan yang telah direncanakan, antara lain :

- a. Salinitas air laut sesuai dengan kondisi lingkungan air laut pada saat kapal berlayar yaitu di perairan Laut Jawa.
- b. Pelat baja lambung kapal yang digunakan sebagai spesimen uji penelitian merupakan pelat baja standar A dari BKI (Biro Klasifikasi Indonesia) yang memiliki komposisi kimia dan sifat mekanis setara dengan pelat baja AISI E 2512.
- c. Anoda korban yang dipakai adalah 3 (tiga) produk paduan aluminium sesuai yang dipakai oleh PT. JMI, Semarang.

1.6. Originalitas Penelitian

Penelitian tentang efektifitas perlindungan korosi dengan anoda korban pada pelat baja kapal AISI E 2512 terhadap laju korosi di dalam media air laut, memakai parameter komposisi kimia paduan aluminium sebagai anoda korban dan waktu ekspose saat uji celup, yang mempengaruhi laju korosi pelat baja dan anoda korban serta menganalisa kinerjanya sebagai pelindung pelat baja kapal dari korosi. Masalah yang akan diteliti adalah tentang perbedaan kinerja antara tiga anoda korban paduan aluminium yang digunakan di dok dan galangan kapal PT. Jasa Marina Indah Semarang. Perbedaan komposisi kimia paduan aluminium sebagai anoda korban dengan ukuran 20,0 mm x 5,0

mm x 2,5 mm (berat 1,025 gram) dan penggunaan media air laut merupakan hal yang membedakannya dari penelitian sejenis yang telah dilakukan oleh Tai Ming Tsai pada tahun 1996, tentang Perlindungan Pelat Baja Menggunakan Anoda Korban di Dalam Air Laut Buatan, dengan parameter paduan anoda korban yang digunakan adalah Al-Zn-Sn, serta anoda korban berbentuk silinder dengan ukuran panjang 10,0 cm dan diameter 2,0 cm. Penelitian lainnya yang dilakukan oleh Juliana Anggono, pada tahun 1999 yaitu tentang Studi Perbandingan Kinerja Anoda Korban Paduan Aluminium dengan Paduan Seng Dalam Lingkungan Air Laut, dengan parameter perbedaan paduan aluminium dan paduan seng sebagai anoda korban dengan ukuran 22,0 mm x 15,0 mm x 10,0 mm, potensial proteksi dan arus galvanik pada salinitas air laut yang berbeda.

Sedangkan yang menjadi kesamaan dalam penelitian ini dengan penelitian sebelumnya adalah metoda eksperimen laboratorium dengan uji celup dan penggunaan waktu ekspose selama 240 jam.

1.7. Sistematika Penulisan

Bagian utama tesis terdiri dari pendahuluan, dasar teori, metodologi penelitian, hasil dan pembahasan, serta kesimpulan dan saran. Pendahuluan berisikan latar belakang, perumusan masalah, manfaat penelitian, tujuan penelitian, pembatasan masalah, dan originalitas penelitian serta sistematika penulisan. Sedang dasar teori menjelaskan mengenai pengertian korosi, mekanisme korosi, korosi pada media air laut, korosi pelat baja lambung kapal, perlindungan korosi pada anoda korban, dan perhitungan laju korosi pelat baja serta perhitungan kebutuhan anoda korban.

Bagian metodologi penelitian menerangkan tentang diagram alir penelitian, observasi lapangan, eksperimen laboratorium, dan perhitungan laju korosi, serta perbandingan hasil eksperimen laboratorium. Selanjutnya pada bagian hasil dan pembahasan menguraikan tentang data dan analisa kebutuhan anoda korban, data dan analisa pengujian korosi serta perbandingan hasil eksperimen laboratorium.

Bagian terakhir berupa kesimpulan dan saran yang berisi mengenai kesimpulan hasil penelitian serta saran bagi para pihak dalam penggunaan anoda korban paduan aluminium yang efektif.

BAB II

DASAR TEORI

2.1 Pengertian Korosi

Korosi di definisikan sebagai penurunan mutu logam akibat reaksi elektrokimia dengan lingkungannya (Trethewey, 1991).

Beberapa hal penting menyangkut definisi ini adalah :

- 1 Korosi berkaitan dengan logam, seperti persamaan berikut :



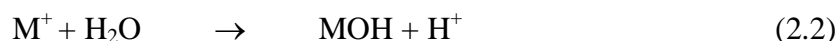
M = simbol untuk atom logam

n = jumlah ion suatu unsur

- 2 Melalui penggunaan istilah degradasi atau penurunan mutu, korosi adalah proses yang tidak dikehendaki. Logam yang terkorosi akan mengalami penipisan permukaan, kerusakan atau perubahan bentuk.
- 3 Penurunan mutu logam tidak hanya melibatkan reaksi kimia, namun juga reaksi elektrokimia yakni antara logam yang bersangkutan terjadi perpindahan elektron. Elektron adalah suatu yang bermuatan negatif, maka pengangkutannya menimbulkan arus listrik, karena reaksi tersebut dipengaruhi oleh potensial listrik.
- 4 Lingkungan adalah semua unsur disekitar logam terkorosi pada saat reaksi berlangsung.

2.2 Mekanisme Korosi

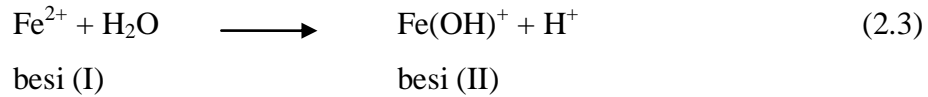
Korosi secara elektrokimia dapat diilustrasikan dengan reaksi antar ion logam dengan molekul air. Mula-mula akan terjadi hidrolisis yang akan mengakibatkan keasaman meningkat (Trethewey, 1991). Hal ini dapat diterangkan dengan persamaan berikut :



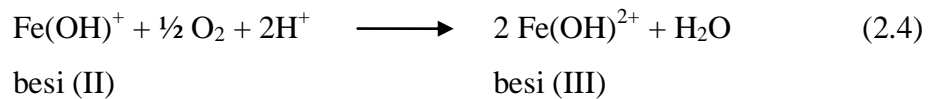
Persamaan ini menggambarkan reaksi hidrolisis yang umum, dimana pada elektrolit yang sebenarnya akan terdapat peran klorida yang penting tetapi akan menjadi rumit untuk diuraikan. Kecenderungan yang rendah dari klorida

untuk bergabung dengan ion-ion hidrogen dalam air mendorong menurunnya pH larutan elektrolit (Trethewey, 1991).

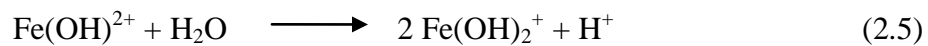
Persamaan reaksi jika reaksi di atas adalah ion besi dan molekul air (Trethewey, 1991), adalah sebagai berikut :



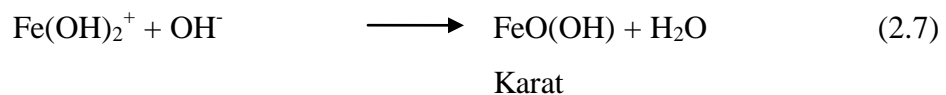
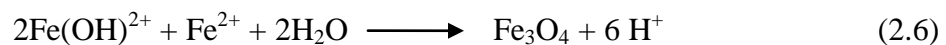
Kemudian reaksi ini dapat berlanjut dengan terjadinya reaksi oksidasi oleh kehadiran oksigen terhadap besi (II), sehingga akan terbentuk ion-ion besi (III) (Trethewey, 1991). Persamaan reaksi tersebut dapat diuraikan sebagai berikut :



Reaksi-reaksi hidrolisis selanjutnya dimungkinkan, yang menyebabkan larutan semakin asam :



Untuk selanjutnya dapat diuraikan reaksi dari ion-ion kompleks sehingga terbentuk hasil korosi utama yaitu magnetit dan karat, berturut-turut dinyatakan dengan rumus Fe_3O_4 dan FeO(OH) [Trethewey, 1991]. Persamaan reaksi-reaksi tersebut adalah :



Laju korosi secara elektrokimia merupakan kecepatan rata-rata perubahan ketebalan atau berat dari logam yang mengalami korosi terhadap waktu melalui proses elektrokimia [Trethewey, 1991].

2.3 Korosi pada Media Air Laut

Korosi yang terjadi dilingkungan air laut di dorong oleh faktor-faktor : kadar gas dalam air laut (*aerosols*), hujan (*rain*), embun (*dew*), kondensasi (*condensation*) dan tingkat kelembaban (*humidity*) serta resistivitas. Secara alami lingkungan air laut mengandung ion khlorida (*chloride ions*) dengan

kombinasi tingginya penguapan (*moisture*), unsur yang terkandung dalam air laut dapat dilihat dalam Tabel.2.1 dan persentasi oksigen terkandung yang juga turut memperparah korosi karena air laut. Korosi pada air laut sangat tergantung pada :

- Kadar khlorida
- pH
- Kadar Oksigen
- Temperatur

Tabel.2.1.Unsur pokok dalam media air laut (Benjamin D, 2006)

<i>Anion</i>	<i>Part/Million</i>	<i>Equevalents per Million</i>	<i>Part per Million per unit Chlorinity</i>
<i>Chloride, Cl⁻</i>	18.980,00	535,30	998,90
<i>Sulfate, SO₄²⁻</i>	2.649,00	55,10	139,40
<i>Bicarbonete, HCO₃⁻</i>	139,70	2,30	7,35
<i>Bromine, Br⁻</i>	64,60	0,80	3,40
<i>Fluoride, F⁻</i>	1,30	0,10	0,07
<i>Boric Acid, H3BO3</i>	26,00	-	1,37
Total		593,60	
<i>Cation</i>	<i>Part/Million</i>	<i>Equevalents per Million</i>	<i>Part per Million per unit Chlorinity</i>
<i>Sodium, Na⁺</i>	10.556,10	159,00	555,60
<i>Magnesium, MG²⁺</i>	1.272,00	104,60	66,95
<i>Calcium, Ca²⁺</i>	400,10	20,00	21,06
<i>Potassium, K⁺</i>	380,00	9,70	20,00
<i>Strotium, Sr²⁺</i>	13,30	0,30	0,70
Total		593,60	

Air laut merupakan lingkungan yang korosif untuk besi dan baja, terutama karena resistivitas air laut sangat rendah ($\pm 25 \text{ Ohm-cm}$) dibandingkan

resistivitas air tawar ($\pm 4000 \text{ Ohm-cm}$). Proses korosi air laut merupakan proses elektrokimia. Faktor –faktor yang mendorong korosi pelat baja dalam media air laut adalah :

- a. Sifat air laut (kimia-fisika dan biologis)
- b. Sifat logam (pengaruh susunan kimia dan *mill scale*)

a. Sifat kimia – fisika air laut

Kandungan garam yang terlarut dalam air laut dan temperatur sangat menentukan penghantaran listrik pada air laut, yang merupakan salah satu faktor mempercepat terjadinya proses korosi. Pada kadar garam yang sama, kenaikan temperatur air laut menyebabkan daya hantar listrik air laut meningkat, sedangkan pada temperatur air laut yang sama dengan kadar garam yang meningkat menyebabkan hantaran listrik air laut naik.

b. Sifat biologis air laut

Pengaruh *fouling* (pengotoran lambung kapal akibat melekatnya hewan dan tumbuhan laut) akan menimbulkan korosi pada pelat lambung kapal. Proses korosi terjadi saat melekatnya mikro organisme bersel satu pada lambung kapal dengan bantuan cat sebagai zat perekatnya, sehingga terdapat lapisan yang mudah mengelupas. Pada lapisan yang mengelupas akan timbul benih-benih hewan laut dan tumbuhan laut yang akan terus berkembang biak.

Mikroorganisme yang menempel di lambung kapal menimbulkan pertukaran zat yang menghasilkan zat-zat agresif seperti : NH_4OH , CO_2 , H_2S dan atom-atom yang agresif, selanjutnya akibat reaksi elektrokimia terbentuklah gas oksigen. Gas oksigen dengan proses *chlorophile* akan membentuk sulfit dan sulfat yang menghasilkan zat yang berpengaruh terhadap terjadinya korosi air laut.

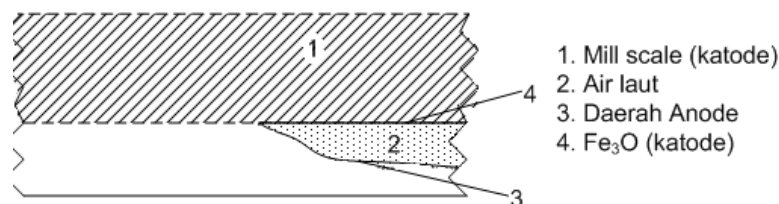
c. Susunan kimia logam

Selain unsur Fe pada pelat baja kapal juga terdapat unsur lainnya seperti C, Si, Mn, Cu, Cr, Ni, S dan P, unsur yang menimbulkan korosi air laut adalah unsur: C, Mn, S dan P.

d. Pembentukan *mill scale* pada pelat baja

Pembentukan *mill scale* terdiri dari tiga lapisan, lapisan terluar adalah Fe_2O , lapisan tengah Fe_3O_4 dan FeO , sedangkan lapisan yang dekat pelat kapal adalah FeO dan Fe. Perbedaan potensial elektrokimia antara pelat baja kapal $\pm 0,28$ volt. Perbedaan potensial elektrokimia tersebut menyebabkan terjadi reaksi yang menimbulkan korosi air laut pada pelat baja kapal.

Lapisan Fe_3O_4 dari hasil korosi air laut pada pelat baja kapal akan menimbulkan daerah anoda seperti Gambar.2.1, yang akan terus meluas sampai dibawah lapisan *mill scale*. Daerah anoda yang kedua ini menimbulkan korosi air laut yang lebih besar dibandingkan dengan daerah anoda yang pertama karena terdapat oksigen bebas yang dapat dengan bebas bereaksi (Benyamin D, 2006).



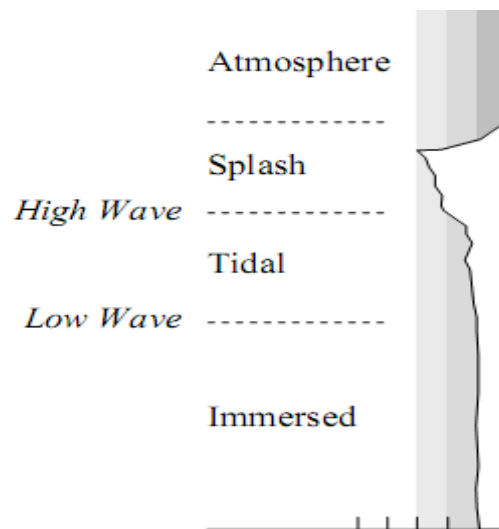
Gambar.2.1. Terjadi korosi dibawah *mill scale* (Benyamin D, 2006).

2.3.1. Zona Korosi Air Laut

Laju korosi dalam lingkungan laut tergantung dari posisi pelat baja kapal yang dipasang, antara lain, zona di atas permukaan air laut, zona di bawah permukaan air laut atau zona antara (*tidal zone*). Konsentrasi klorida air laut tergantung pada kedekatan dan ketinggian dari permukaan air laut. Korosi berkurang pada daerah yang lebih tinggi dari permukaan air laut.

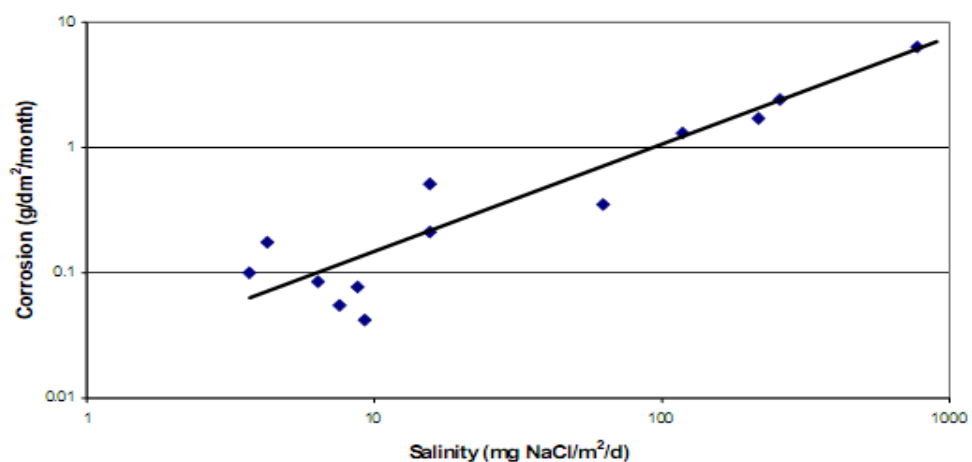
karena kurangnya percikan air garam yang bekerja sebagai elektrolit dan juga karena temperatur lebih tinggi dan kelembaban lebih rendah.

Kemudian gelombang yang pecah pada permukaan pelat baja lambung kapal juga memberi kontribusi terhadap laju korosi pelat tersebut, terutama terjadi pada daerah terdekat dengan permukaan air laut (*splash zone*) dan pada zona ini juga terjadi erosi seperti Gambar.2.2., sehingga memperparah kerusakan pelat.



Gambar.2.2. Laju korosi berdasarkan zona korosi (Benjamin D , 2006)

Laju korosi juga terpengaruh oleh salinitas atmosfer (kadar garam di udara yang tergantung letak geografis) seperti dijelaskan pada Gambar.2.3. serta pengaruh perubahan lingkungan air laut terhadap korosi baja Tabel.2.2.



Gambar.2.3. Laju korosi pengaruh dari salinitas udara (Benjamin D , 2006).

Tabel.2.2. Pengaruh perubahan lingkungan air laut terhadap korosi baja (Fontana, 86)

Faktor dalam air laut	Pengaruh pada besi dan baja
Ion klorida	Sangat korosif terhadap logam yang mengandung besi. Baja karbon dan logam besi tidak dapat di pasifkan (garam air laut mengandung klorida lebih dari 55%).
Kehantaran listrik	Kehantaran yang tinggi memungkinkan anoda dan listrik katoda tetap bekerja walau jaraknya jauh, jadi peluang terkena korosi meningkat dibanding dalam air tawar.
Oksigen	Korosi pada baja dikendalikan secara katodik, Oksigen akan mendepolarisasi katoda, sehingga mudah terjadi korosi terutama dengan kandungan oksigen yang tinggi.
Kecepatan aliran air laut	Laju korosi meningkat dengan adanya gelombang dan arus laut yang tinggi hal ini menyebabkan : 1. menghancurkan lapisan anti karat, 2. menghasilkan banyak oksigen, mempercepat penetrasi, membuka rongga di permukaan baja.
Temperatur	Temperatur air laut yang tinggi akan meningkatkan terjadinya korosif.
<i>Fouling</i> (biologis)	Pengotoran pelat baja karena binatang laut akan meningkatkan terjadinya korosif.
Tegangan	Tegangan yang berulang akan menyebabkan kelelahan material terutama yang telah terkena korosi, dan akan mempercepat kegagalan struktur
Pencemaran	Sulfida dalam polutan yang mencemari air laut akan meningkatkan korosif walaupun penurunan oksigen dapat mengurangi korosi.
<i>Silt</i> dan sendimen tersuspensi	Erosi pada permukaan baja oleh bahan tersuspensi dalam air laut akan cenderung meningkatkan korosi
Terbentuknya lapisan	Lapisan karat dan kerak mineral (garam-garam kalsium dan magnesium) akan mengganggu difusi oksigen ke permukaan katoda sehingga memperlambat korosi

2.3.2. Salinitas Air Laut

Korosi akibat media air laut juga dipengaruhi oleh tingkat penggaraman atau salinitas air laut. Salinitas didefinisikan sebagai berat keseluruhan dalam gram kadar garam-garam non organik pada 1 kg air laut (jika unsur-unsur klorida dan semua unsur karbonat digantikan dengan unsur-unsur oksida dalam jumlah sesuai).

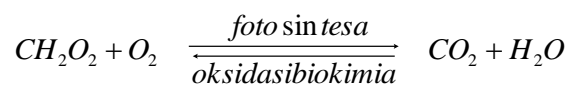
Salinitas air laut dinyatakan dengan satuan per seribu ($^{\circ}/_{\infty}$), salinitas air laut ini bervariasi antara : 33,00 $^{\circ}/_{\infty}$ sampai dengan 37,00 $^{\circ}/_{\infty}$. Konsentrasi garam terlarut atau ion/molekul dalam air laut dapat dilihat pada Tabel.2.3 berikut .

Tabel.2.3. Konsentrasi Ion/Molekul pada air laut densitas 1,023 g/cm³ pada 25°C (Anggono,2000)

Garam	Salinitas ($^{\circ}/_{\infty}$)		
	33	35	37
NaCl	23.13	24.53	25.93
MgCl ₂	4.900	5.200	5.497
Na ₂ SO ₄	4.090	4.090	4.090
CaCl ₂	1.090	1.160	1.230
KCl	0.660	0.695	0.735
NaHCO ₃	0.201	0.201	0.201
KBr	0.101	0.101	0.101
H ₃ BO ₃	0.027	0.027	0.027
SrCl ₂	0.024	0.025	0.026
NaF	0.003	0.003	0.003

2.3.3. Keasaman (pH) Air Laut

Air laut memiliki tingkat keasaman lebih tinggi pada permukaan. Tingkat keasaman (pH) terbentuk karena kandungan 93% karbon anorganik berupa HCO_3^- , 6% berupa CO_3^{2-} dan 1 % berupa CO_2 . Ion karbonat relatif tinggi pada permukaan dan hampir selalu jenuh dengan kalsium karbonat. Hal ini menyebabkan terjadinya pengendapan jenuh (*calcareous scale*) pada permukaan logam. Konsentrasi CO_2 dan O_2 mempunyai hubungan yang erat dengan pH air laut dalam proses fotosintesa dan oksidasi biokimia dengan reaksi sebagai berikut:



Reaksi dari kiri ke kanan, oksigen terlarut digunakan dan CO_2 dihasilkan. Hasil CO_2 akan membuat air lebih asam, hal ini akan menurunkan pH dan juga menurunkan kejenuhan karbonat. Pengendapan kerak terjadi pada pH yang lebih tinggi dimana ion OH^- dihasilkan selama reduksi oksigen terlarut.

2.4 Korosi Pelat Baja Lambung Kapal

Kapal baja merupakan kapal dengan seluruh bangunan terbuat dari baja paduan dengan komposisi kimia sesuai standar untuk konstruksi kapal yang dikeluarkan oleh biro klasifikasi kapal (*Standards: ABS, BKI, DNV, RINA, GL, LR, BV, , NK, KR, CCS and etc*) dengan klas baja : A, B, C, D dan E. (*Grade: A, B, D, E, AH32-AH40, DH32-DH40, A32, A36, D32, D36 and etc*) dengan tebal: 8 mm s/d 100 mm, lebar : 1500 mm s/d 2700 mm, panjang : 6 m s/d 13 m (PT. BKI, 2006)

Baja untuk konstruksi kapal pada umumnya dibagi menjadi tiga bagian, yaitu baja konstruksi kapal biasa, baja konstruksi kapal dengan tegangan tinggi, dan baja tempa. Baja untuk konstruksi kapal mempunyai sifat mekanis yang sudah mendapat persetujuan dari BKI sebagaimana tercantum dalam tabel 2.4 berikut:

Tabel 2.4. Sifat Mekanis Baja Kapal (BKI. 2006)

No.	Jenis Baja	Kekuatan Tarik (Kg/mm ²)	Tegangan Luluh (Kg/mm ²)	Regangan Patah (%)	Keterangan
1	Baja Kapal biasa	41 ~ 50	≥ 24	≥ 22	Bagian kapal yang mendapat tekanan kecil
2	Baja Tegangan Tinggi	1. 48 ~ 60 2. 50 ~ 63	≥ 32 Min. ≥ 36	≥ 22	Bagian kapal yang mendapat tekanan tinggi
3	Baja Tempa	Min. 41	-	-	Poros, kopling engkol, linggi

Pemakaian pelat baja untuk bangunan kapal memiliki resiko kerusakan yang tinggi, terutama terjadinya korosi pada pelat baja yang merupakan proses elektrokimia, akibat lingkungan air laut yang memiliki resistivitas sangat rendah ± 25 Ohm-cm, jika dibandingkan dengan air tawar ± 4.000 Ohm-cm, (Caridis, 1995) dan sesuai dengan posisi pelat pada lambung kapal. pelat lambung kapal yang mengalami korosi dapat dilihat pada Gambar.2.4.



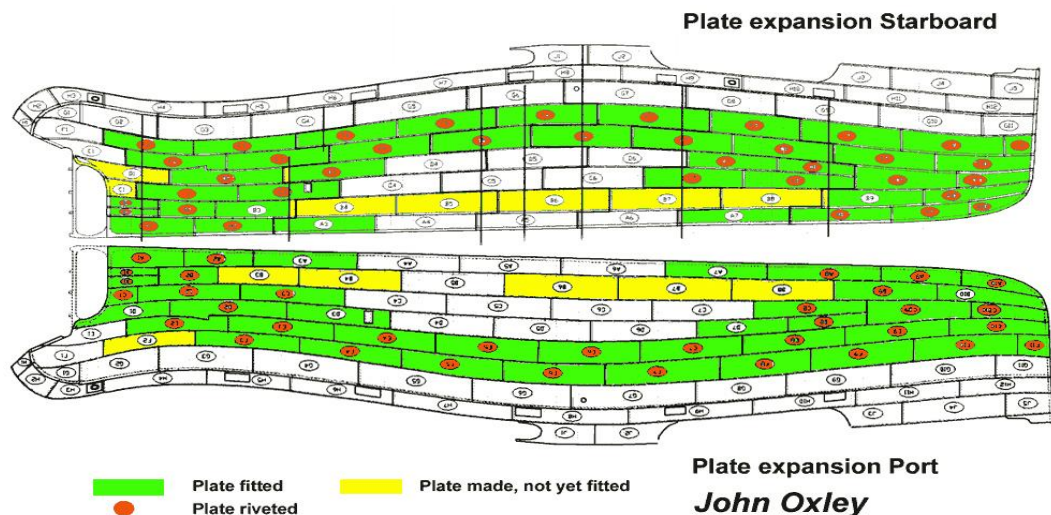
Gambar.2.4. Pelat lambung kapal (*LCT Containers Carrier : MV. Sirena*).

Posisi pelat baja lambung kapal terbagi dalam tiga bagian yaitu :

- a. Selalu tercelup air (pelat lajur alas, pelat lajur bilga, dan pelat lajur sisi sampai sarat minimal).

- b. Keluar masuk air (pelat lajur sisi kapal dari sarat air minimal sampai sarat air maksimal).
- c. Tidak tercelup air (pelat lajur sisi mulai dari sarat maksimal sampai dek uta ma).

Sedang Gambar 2.5. berikut ini, memperlihatkan masing-masing posisi lajur pelat pada lambung kapal pada sisi kiri dan kanan kapal.



Gambar.2.5. Lajur pelat lambung kapal (John Oxley Shipyard).

Korosi yang dapat terjadi pada pelat baja kapal dapat dibedakan menjadi beberapa jenis (Caridis, 1995), yaitu :

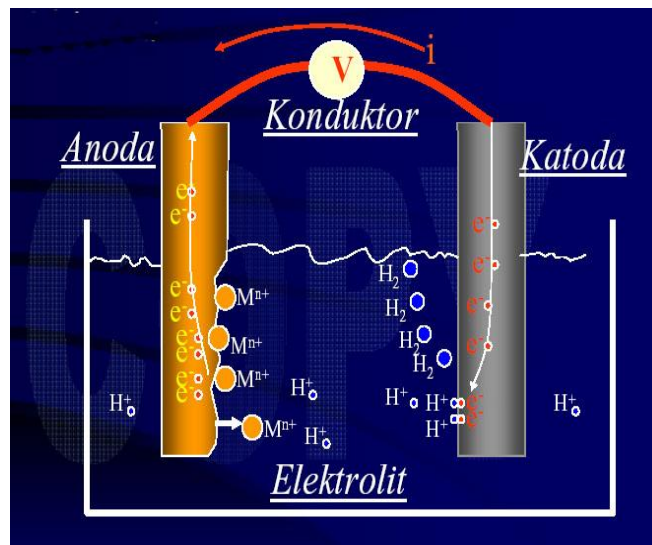
1. Korosi Merata (*uniform corrosion*), seluruh permukaan pelat terserang korosi biasanya pada bagian pelat yang berada diatas garis air.
2. Korosi Pelobangan (*pitting corrosion*), pada permukaan pelat terjadi lobang yang semakin lama akan bertambah dalam dan akhirnya dapat menembus pelat.
3. Korosi Tegangan (*stress corrosion*), korosi pada bagian pelat yang memikul beban besar.
4. Korosi Erosi (*erosion corrosion*), korosi yang terjadi pada material yang menerima tumbukan partikel cairan yang mengalir dengan kecepatan tinggi.

5. Korosi Celah (*crevice corrosion*), korosi yang terjadi pada celah, daerah jepitan, sambungan dan daerah yang ditutupi binatang dan tumbuhan kecil.

2.5. Perlindungan Korosi dengan Anoda Karbon

Ada dua jenis proteksi katodik, yaitu dengan metoda anoda korban (*sacrificial anode*) dan dengan metoda arus tanding (*impressed current*). Anoda korban relatif lebih murah, mudah dipasang bila dibandingkan dengan metoda arus tanding. Keuntungan lainnya adalah tidak diperlukannya peralatan listrik yang mahal dan tidak ada kemungkinan salah arah dalam pengaliran arus (Trethewey, 1991).

Barangkali yang paling sederhana untuk menjelaskan cara kerja proteksi katodik dengan anoda korban adalah menggunakan konsep tentang sel korosi basah seperti Gambar.2.6. Kaidah umum dari sel korosi basah adalah bahwa dalam suatu sel, anodalah yang terkorosi, sedangkan yang tidak terkorosi adalah katoda. Anoda-anoda yang dihubungkan ke struktur dengan tujuan mengefektifkan perlindungan terhadap korosi dengan cara ini disebut anoda-anoda korban (*sacrificial anodes*). Kita dapat memanfaatkan pengetahuan mengenai deret galvanik untuk memilih suatu bahan yang akan menjadi anoda. Anoda korban yang biasa digunakan di lingkungan pantai diantaranya adalah seng dan aluminium (Trethewey, 1991).



Gambar 2.6. Sel korosi basah sederhana (Trethewey, 1991).

Perlindungan yang akan diberikan oleh seng akan luar biasa seandainya logam tersebut dapat dilarutkan dengan laju yang kurang-lebih konstan. Seng murni yang tersedia di pasaran, terkorosi di air laut sambil membentuk selapis kulit kedap air yang sangat membatasi keluaran arusnya. Diantara bahan-bahan pengotor : besi, tembaga dan timbal; yang paling menimbulkan efek merusak pada anoda adalah besi. Kelarutannya dalam seng sedemikian rendah ($<0.0014\%$) sehingga apabila berlebih maka kelebihan-kelebihan itu akan berupa partikel-partikel terpisah. Hal ini pada gilirannya akan membentuk sel galvanik lokal yang menghasilkan suatu lapisan seng hidroksida/seng karbonat yang tidak dapat larut dan tidak menghantarkan listrik; yang akhirnya menjadikan anoda tidak efektif (Trethewey, 1991).

Dalam keadaan normal aluminium mengalami korosi sumuran dalam air laut diakibatkan oleh lapisan oksida yang bersifat katodik yang selalu membungkus logam itu ketika masih berada di udara bebas. Unsur paduan yang ditambahkan dapat mencegah terbentuknya selaput oksida yang merata, merekat erat dan protektif sehingga kegiatan galvanik terus berlangsung. Dengan tujuan inilah orang mengembangkan paduan aluminium yang menggunakan seng dan air raksa atau seng dan indium. Paduan aluminium mempunyai nisbah daya listrik/berat yang lebih besar dibandingkan dengan paduan seng dan penggunaan paduan aluminium mulai menggantikan penggunaan seng dalam beberapa penerapan khususnya pada industri lepas pantai (Trethewey, 1991).

Anoda korban yang dianjurkan untuk dipakai pada kapal berdasarkan Biro Klasifikasi Indonesia dalam *Regulation for the Corrosion Protection and Coating System* sesuai Tabel.2.5 dan Tabel 2.6, sebagai berikut ini.

Tabel.2.5. Anoda korban Aluminium aplikasi dalam air laut (BKI, 2004)

Elemen	KI- Al1	KI- Al2	KI- Al3
Si	$\leq 0,10$	$\leq 0,10$	S1 + Fe $\leq 0,10$
Fe	$\leq 0,10$	$\leq 0,13$	
Cu	$\leq 0,005$	$\leq 0,005$	$\leq 0,02$
Mn	N/A	N/A	0,15 – 0,50
Zn	2,0-6,0	4,0-6,0	2,0-5,0
Ti	-	-	0,01-0,05
In	0,01-0,03	-	0,01-0,05
Sn	-	0,05-0,15	-
Other	$\leq 0,10$	$\leq 0,10$	$\leq 0,10$
Al	residue	Residue	Residue
Potential (T=20°C)	-1,05 Volt Ag/AgCl/See	-1,05 Volt Ag/AgCl/See	-1,05 Volt Ag/AgCl/See
Qg (T=20°C)	2000 Ah/kg	2000 Ah/kg	2700 Ah/kg
Efficiency (T=20°C)	95%	95%	95%

Tabel.2.6. Anoda korban Seng aplikasi dalam media air laut (BKI, 2004)

Elemen	KI- Zn1	KI- Zn2
Al	0,100 – 0,500	$\leq 0,0100$
Cd	0,025 – 0,070	$\leq 0,0040$
Cu	$\leq 0,005$	$\leq 0,0050$
Fe	$\leq 0,005$	$\leq 0,0014$
Pb	$\leq 0,006$	$\leq 0,0060$
Zn	$> 99,22$	$\geq 99,880$
Potential (T=20°C)	-1,03 Volt Ag/AgCl/See	-1,03 Volt Ag/AgCl/See
Qg (T=20°C)	780 Ah/kg	780 Ah/kg
Efficiency (T=20°C)	95%	95%

2.6. Perhitungan Laju Korosi Pelat Baja dengan Perlindungan Anoda Korban

Dalam hal ini perlu memperhitungkan luas relatif dari anoda dan katoda, karena apabila anoda telah terkorosi habis maka katoda akan segera terkorosi. Jadi laju korosi anoda harus diperhitungkan untuk memperkirakan penggantian anoda. Parameter untuk menghitung laju korosi adalah keluaran arus per satuan luas permukaan terbuka yang juga disebut laju pengausan (*wastage*). Juga dinyatakan dengan laju hilangnya logam dalam satuan volume maupun satuan masa perluas permukaan per tahun. Dalam perlindungan korosi dengan metode anoda korban ini, laju korosi dapat dinyatakan sebagai berikut (Trethewey, 1991):

$$CR = \frac{K \times W}{A \times D \times T} \quad (2.8)$$

dimana :

CR = Laju korosi (mm/th)

W = Massa yang terkorosi (gram)

A = Luas tercelup (cm²)

K = 8.76×10^4

T = Waktu (jam)

D = Densitas (gram/cm³)

2.7. Perhitungan Kebutuhan Anoda Korban

Luas permukaan basah (*wetted surface area*) merupakan rancang bangun luas permukaan lambung kapal yang tercelup di dalam air laut sangatlah diperlukan, untuk menentukan berapa banyak anoda yang diperlukan, tempat peletakan anoda korban, dan lain sebagainya.

Rumus – Rumus dan Tabel - Tabel yang diperlukan dalam perhitungan, mengacu pada standar *Det Norske Veritas Industry Norway AS*, RP B401 yang terdapat dalam Tabel.2.7 dan Tabel.2.8 sebagai berikut :

Tabel 2.7. Desain arus rata – rata densitas berdasarkan kedalaman dan iklim
(Det Norske Veritas Industry Norway, 1993)

Kedalaman (m)	Desain arus densitas (rata – rata) dalam A/m ²			
	Tropical (>20°C)	Sub- Tropical (12 - 20°C)	Beriklim sedang (7-12°C)	Sangat dingin (<7°C)
$0 \leq 30$	0.070	0.080	0.100	0.120 ⁽¹⁾
> 30	0.060	0.070	0.080	0.100

¹⁾ Effects berbagai penggesekan es belum tercakup

2.7.1. Perhitungan permintaan arus (I_c)

Jika area individu (A_c) tiap unit yang diproteksi dikalikan dengan desain arus densitas (i_c), dan factor kerusakan lapisan (f_c), maka akan diperoleh : (Fontana, 1986)

$$I_c = A_c \times f_c \times i_c \quad \dots(\text{Ampere}) \quad (2.9)$$

Dimana I_c adalah permintaan arus, A_c area yang akan diproteksi, f_c faktor kerusakan lapisan dan i_c faktor desain arus densitas, mengacu pada Tabel 2.8. Sedangkan area individu atau area yang akan diproteksi, diperoleh dengan menggunakan rumus :

$$A_c = (2T + B) \times Lbp \times p \quad \dots(\text{m}^2) \quad (2.10)$$

dimana :

Lbp : Panjang antara garis tegak ... (m)

T : Sarat air ... (m)

B : Lebar Kapal ... (m)

p : Faktor, untuk kapal cargo nilainya 0,85

Untuk desain katodik rata – rata dan terakhir faktor kerusakan pelapis di hitung dengan memperhatikan desain umur.

$$f_c(\text{rata – rata}) = k_1 + k_2 \frac{t_f}{2} \quad (2.11)$$

$$f_c(\text{terakhir}) = k_1 + k_2 \cdot t_f \quad (2.12)$$

Jika dihitung nilainya lebih dari 1, $f_c = 1$ harus digunakan di dalam desain. Persamaan diatas didasarkan untuk maksud desain saja, dan tidak diharapkan membayangkan model sesungguhnya sebagai faktor kerusakan pelapis.

Dimana desain umur sistem katodik proteksi melebihi dari sistem pelapis, f_c (rata – rata) mungkin dihitung menggunakan :

$$f_c (rata - rata) = 1 - \frac{(1 - k_1)^2}{2k_2 t_f} \quad (2.13)$$

Tabel 2.8. Konstanta (k_1 dan k_2) untuk perhitungan faktor kerusakan pelapis (*Det Norske Veritas Industry Norway, 1993*)

Kedalaman (m)	Kategori Pelapis			
	I ($k_1 = 0.1$) k_2	II ($k_1 = 0.05$) k_2	III ($k_1 = 0.02$) k_2	IV ($k_1 = 0.02$) k_2
$0 \leq 30$	0.10	0.03	0.015	0.012
> 30	0.05	0.02	0.012	0.012

- Data untuk kedalaman > 30 m mungkin digunakan pada kompartemen yang tenggelam dan kompartemen yang ditutup dengan bebas dari udara.
- Data untuk pelapis kategori III, kedalaman > 30 m, digunakan pada perhitungan permintaan arus katodik *densitas* untuk beton pelapis penguat baja dengan penggabungan *epoxy* atau persamaannya. (minimal $200 \mu\text{m}$ DFT).

2.7.2. Perhitungan masa anoda korban

Total masa anoda korban (M), dapat dihitung dengan rumus :

$$M = \frac{I_c (rata - rata) . t_f . 8760}{u . \mathcal{E}} \quad \dots (\text{kg}) \quad (2.14)$$

Dimana I_c , permintaan arus desain, t_f umur dari proteksi katodik (tahun), 8760 konstanta, dari pertahun dijadikan perjam, u adalah faktor guna anoda

korban (Ampere), ϵ adalah *electrochemical efficiency material anode (aluminium alloy)* (Ampere hour/kg).

2.7.3. Kemampuan material anoda korban

Dalam Tabel 2.9 memberikan nilai electrochemical efficiency (ϵ) anoda korban yang digunakan dalam perhitungan desain untuk berat anoda korban yang disyaratkan.

Tabel 2.9. Desain nilai *Electrochemical efficiency* untuk Al dan Zn pada anoda korban (Fontana, 1986)

Macam material anoda	<i>Electrochemical efficiency ... (Ah/kg)</i>
Al	2000 ¹⁾
Zn	700 ²⁾

¹⁾ Temperatur anoda : maksimal 25 °C

²⁾ Temperatur anoda : maksimal 50 °C

2.7.4. Faktor guna anoda korban (u)

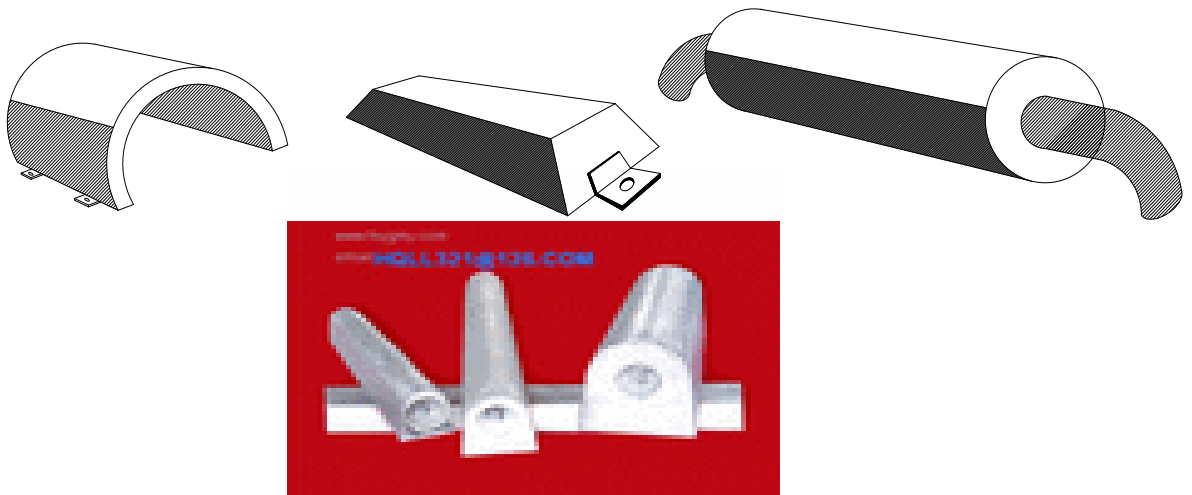
Faktor guna anoda tergantung pada desain anoda, mengenai dimensi dan lokasi inti anoda. Faktor guna dalam Tabel 2.10 adalah perkiraan konservatif detail desain anoda dan digunakan untuk perhitungan desain. Salah satu bentuk desain anoda korban dapat dilihat dalam Gambar.2.7.

Tabel 2.10. Desain faktor guna anoda (Fontana, 1986)

Tippe Anoda	Faktor guna anoda
<i>Long ¹⁾ slenderStand off</i>	0.9
<i>Long ¹⁾ flush-mounted</i>	0.85
<i>Short ²⁾ flush-mounted</i>	0.80
<i>Bracelet, Half shell type</i>	0.80
<i>Bracelet, Segmented type</i>	0.75

¹⁾ Panjang Anoda > 4 x tebal

²⁾ Panjang Anoda < 4 x tebal



Gambar 2.7. Desain Secara Umum Anoda Korban (Fontana, 1986).

Keterangan :

- *Slender stand-off* (kiri)
- *Elongated flush-mounted* (tengah)
- *half-shell bracelet* (kanan)

2.7.5. Perhitungan arus keluar.

Untuk menghitung arus yang keluar dari anoda korban maka diperlukan rumus dari hukum ohm (Fontana, 1986):

$$I_s = \frac{E^{\circ}c - E^{\circ}a}{R_a} \quad \dots(\text{Ampere}) \quad (2.15)$$

dimana :

I_s = Arus yang keluar dari anoda korban

$E^{\circ}c$ = Desain proteksi potensial,

dimana untuk air laut $\text{Ag/AgCl} = -0,80 \text{ V}$

$E^{\circ}a$ = Desain sirkuit tertutup potensial anoda (V)

R_a = Hambatan anoda, dimana di asumsikan sama dengan total hambatan sirkuit

Sirkuit tertutup potensial anoda untuk Al dan Zn berdasarkan anoda korban dapat dilihat pada Tabel 2.11, di bawah ini.

Tabel 2.11. Sirkuit tertutup potensial anoda untuk Al dan Zn berdasarkan anoda korban (Fontana, 1986)

Macam material anoda	Lingkungan	Sirkuit tertutup anoda Potensial
Al	Air laut	- 1,05
	Endapan	- 0,95
Zn	Air laut	- 1,00
	Endapan	- 0,95

Det Norske Veritas Industri Norway AS, RP B401, memberikan rekomendasi formula hambatan anoda untuk berbagai macam bentuk anoda korban. Dengan memperhatikan operator, formula dalam Tabel 2.12. digunakan dalam perhitungan desain anoda.

Tabel 2.12. Formula hambatan anoda (Ra) (Fontana, 1986)

Macam Anoda	Rumus Hambatan
<i>Long Slender stand-off¹⁾</i>	$Ra = \frac{\rho}{2\pi L} \left(\ln \frac{4L}{r} - 1 \right) \quad (2.16)$
<i>Short Slender stand-off¹⁾</i> $L < 4r$	$Ra = \frac{\rho}{2\pi L} \left[\ln \left\{ \frac{2\rho}{r} \left(1 + \sqrt{1 + \left(\frac{r}{2L} \right)^2} \right) \right\} + \frac{r}{2L} - \sqrt{1 + \left(\frac{r}{2L} \right)^2} \right] \quad (2.17)$
<i>Long flush-mounted</i> $L > 4 \times \text{lebar dan tebal}$	$Ra = \frac{\rho}{2..S} \quad (2.18)$
<i>Short flush-mounted, bracelet and other</i>	$Ra = \frac{0.315.p}{\sqrt{A}} \quad (2.19)$

dimana :

ρ = Resistivitas lingkungan (ohm.m)

L = Panjang Anoda (m)

r = radius anoda (m)

S = Perhitungan rata - rata dari panjang dan lebar anoda (m)

A = Luas permukaan area.

Untuk *non-Cylindrical* anoda $r=C/2\pi$, dimana C=Persilangan batas luar (m)

- ¹⁾ Digunakan untuk anoda berjarak minimum 0,30 m dari spesimen yang akan diproteksi, Untuk jarak anoda ke spesimen kurang dari 0,30 m tetapi minimum 0,15 m mungkin diperbolehkan jika faktor korosi 1,3 di gunakan.

2.8. Studi Perbandingan Kinerja Anoda Korban Paduan Aluminium dengan Paduan Seng dalam Lingkungan Air Laut

Penelitian sebelumnya, "*Studi Perbandingan Kinerja Anoda Korban Paduan Aluminium dengan Paduan Seng dalam Lingkungan Air Laut*", membahas tentang kinerja anoda korban paduan Zn dan Al, dimana komposisi untuk kedua paduan tersebut dapat dilihat pada Tabel 2.13. Anoda korban yang digunakan mempunyai ukuran 22x15x10 mm (Anggono, 1999).

Tabel 2.13. Komposisi kimia anoda korban paduan seng dan paduan aluminium (Anggono, 1999)

Anoda Paduan Seng		Anoda Paduan Aluminium	
Unsur	Komposisi (% Berat)	Unsur	Komposisi (% Berat)
Kadmium	0.150	Tembaga	0.006
Tembaga	0.005	Besi	0.012
Besi	0.005	Seng	0.150
Silikon	0.125	Silikon	5.000
Aluminium	0.500	Titanium	0.040
Timbal	0.006	Indium	0.030
Seng	<i>Balanced</i>	Aluminium	<i>Balanced</i>

Baja karbon yang digunakan dalam penelitian ini berbentuk pelat tipe AISI SAE 1010 berukuran 31 x 20 x 2 mm dengan luasan yang diproteksi bervariasi 1:1, 2:1, 3:1 terhadap luasan anoda. Pembersihan spesimen dilakukan berdasarkan ASTM G1-81, "*Standard Practice for the Preparing, Cleaning, and Evaluating Corrosion Test Speciment*". Untuk air laut yang digunakan divariasikan konsentrasinya dengan salinitas 33‰, 35‰, dan 37‰, sesuai dengan ASTM D1141-98, "*Standard Practice for The Preparation Substitute Ocean Water*". Pengujian korosi dilakukan dengan metoda uji celup pasangan anoda dan katoda yang dihubungkan dengan kabel tembaga, mengacu pada standar ASTM G71-81, "*Standard Practice for Conducting and Evaluating Galvanic Corrosion Test in Electrolytes*". Volume larutan elektrolit yang digunakan sesuai standar tersebut adalah 40 cm³ untuk setiap 1,0 cm² luas permukaan uji yang tercelup. Kehilangan berat specimen uji dipakai sebagai data dalam perhitungan laju korosinya (Anggono, 1999).

Dari hasil celup anoda dan katoda, diperoleh hasil yaitu potensial proteksi baja karbon oleh paduan aluminium lebih negatif daripada yang dihasilkan oleh paduan seng. Arus galvanik yang dihasilkan oleh paduan aluminium lebih besar daripada yang dihasilkan oleh paduan seng, hal ini disebabkan karena pada paduan seng terdapat pengotor (*impurities*) seperti besi, tembaga dan timbal. Sedangkan pada paduan aluminium dengan penambahan seng dan indium akan mencegah terbentuknya lapisan oksida yang merata pada permukaan aluminium yang dapat membatasi arus galvanik antara anoda dan katoda. Penambahan komposisi seng sampai dengan 5% dan indium sampai dengan 0.0484% akan menghasilkan potensial proteksi yang lebih negatif. Bila ditinjau dari variasi salinitas, laju korosi pada paduan aluminium meningkat dengan naiknya salinitas air laut karena pengaruh garam-garam klorida seperti yang terjadi pada korosi baja karbon. Hal ini juga terjadi pada paduan seng, laju korosi sedikit meningkat pada salinitas 35 ‰ tetapi menurun pada salinitas 37‰. Salinitas dapat didefinisikan sebagai berat keseluruhan dalam gram garam-garam non-organik dalam 1 kg air laut bila

seluruh unsur-unsur *bromida* dan *iodida* digantikan dengan unsur-unsur oksida dalam jumlah yang sesuai. Dengan adanya pengaruh ion-ion Mg^{2+} dan Ca^{2+} dapat mencegah terjadinya korosi pada paduan seng (Anggono, 1999).

Secara umum dari penelitian tersebut dapat disimpulkan bahwa peningkatan salinitas dari 33‰ sampai 37‰ secara umum meningkatkan kinerja anoda korban paduan seng maupun aluminium. Peningkatan luas struktur yang diproteksi akan menyebabkan peningkatan arus galvanik yang terjadi, yang secara umum akan menurunkan kapasitas dan efisiensi, serta meningkatkan laju konsumsi anoda korban. Kinerja anoda korban paduan aluminium lebih baik daripada paduan seng. Dan dari hasil foto makro menunjukkan bahwa pada anoda korban paduan seng maupun paduan aluminium terjadi korosi yang tidak merata dengan adanya korosi lubang (*pitting*) di permukaannya (Anggono, 1999).

2.9. Perlindungan Baja Menggunakan Anoda Korban Aluminium dalam Air Laut Buatan

Penelitian tentang, “*Protection of Steel Using Aluminum Sacrificial Anodes in Artificial Seawater*” (Tsai, 1996), mengamati kemampuan beberapa paduan Al-Zn-In yang dipakai sebagai anoda untuk perlindungan katodik di dalam air laut. Anoda korban yang digunakan dalam penelitian ini dihasilkan dari proses pengecoran, berbentuk silinder dengan ukuran panjang 10,0 cm dan diameter 2,0 cm (Tsai, 1996). Komposisi dari beberapa anoda korban paduan aluminium tersebut terlihat pada Tabel 2.14 di bawah ini.

Tabel 2.14. Komposisi kimia anoda korban paduan aluminium (Tsai, 1996)

No. Paduan	Zn	In	Si	Fe	Al
Paduan A	3.5	0.01	0.04	0.05	Balanced
Paduan B	3.5	0.03	0.04	0.05	Balanced
Paduan C	3.5	0.05	0.04	0.05	Balanced
Paduan D	2.0	0.03	0.04	0.05	Balanced
Paduan E	5.0	0.03	0.04	0.05	Balanced

No. Paduan	Zn	In	Si	Fe	Al
Paduan A	3.5	0.01	0.04	0.05	Balanced
Paduan B	3.5	0.03	0.04	0.05	Balanced
Paduan C	3.5	0.05	0.04	0.05	Balanced
Paduan D	2.0	0.03	0.04	0.05	Balanced
Paduan E	5.0	0.03	0.04	0.05	Balanced

Uji kemampuan anoda korban aluminium dilakukan berdasarkan standar *Japan Society of Corrosion Engineering*. Spesimen uji ditutup dengan plester anti-asam kecuali area yang akan diekspos ke dalam larutan. Baja *stainless steel* sebagai katoda dengan luas area yang terekspose adalah 300 cm² dicelupkan ke dalam 1 liter larutan uji sesuai ASTM D1141-75 *artificial seawater* yang digunakan sebagai acuan dalam membuat larutan untuk mengukur kemampuan anoda korban aluminium dimana data yang akan dicari adalah *open circuit potential* (V, SCE), *current capacity* (Ah/Kg) dan *current efficiency* (%). Suatu Galvanostat model Nichia G1001E digunakan dalam penelitian, dengan densitas arus dijaga pada 1 mA/cm² dan temperatur 25±1 °C selama 240 jam. Setelah tes, spesimen yang terkorosi dikeluarkan dan dibersihkan secara kimiawi dalam suatu larutan *chromic acid* (2%), *phosphoric acid* pada temperatur 80 °C diikuti dengan pencucian dengan air suling (Tsai, 1996).

Dari hasil pencelupan diperoleh data kinerja anoda korban paduan aluminium yang terbaik. Dalam hal ini kapasitas arus dihitung dengan membagi total arus keluar dengan kerugian berat anoda. Kemampuan anoda korban aluminium sangat dipengaruhi oleh penambahan elemen paduan. Hasil menunjukkan bahwa paduan C dengan komposisi Al - 3.5% Zn, 0.05% In mempunyai kapasitas arus yang terbaik (2680 Ah/Kg), *current efficiency* (91%) dan *open circuit potential* yang paling negatif (-1.13 V, SCE) dari lima paduan. Walaupun dalam jumlah yang kecil, unsur indium dalam paduan Al-Zn-In memberikan keuntungan (Tsai, 1996).

2.10. Hubungan Efisiensi Anoda Korban Al-Zn-In terhadap Perpindahan

Grafik Polarisasi Menggunakan Metode Potensial Dinamik

Hubungan Efisiensi Anoda Korban Al-Zn-In terhadap Perpindahan Grafik Polarisasi Menggunakan Metode Potensial Dinamik (*“Correlation Efficiency Of Sacrificial Anode Al-Zn-In Toward Movement Of Polarization Curve Using Potentiodynamic Method ”*) merupakan penelitian yang menganalisa efisiensi anoda korban yang menyatakan bahwa efisiensi anoda korban Al-Zn-In berkisar 63,8 % - 94,2 %, dimana efisiensi ini berbanding terbalik dengan volume hidrogen yang tertampung. Berdasarkan efisiensi tersebut maka anoda korban Al-Zn-In dengan efisiensi 94,2 % mempunyai potensial korosi lebih negatif, -1,135 V vs SCE dibanding anoda korban Al-Zn-In dengan efisiensi 63,8 % yang mempunyai potensial korosi -0,095 V vs SCE. Anoda korban Al-Zn-In dengan efisiensi 94,2 % akan memberikan perlindungan potensial korosi terhadap struktur maksimal -0,952 V vs SCE. Sedangkan anoda korban Al-Zn-In dengan efisiensi 63,8 % hanya dapat memberikan perlindungan potensial korosi maksimal -0,866 V vs SCE (Andy Rustandi, 2005).

2.11. Karakteristik Elektrokimia Paduan AL-Zn-Mg sebagai Anoda Korban

Dalam Air Laut

Karakteristik Elektrokimia Paduan AL-Zn-Mg sebagai Anoda Korban Dalam Air Laut (*“Electrochemical Characteristics Of Al-Zn-Mg Alloys As Sacrificial Anodes In Sea Water”*) menjelaskan bahwa anoda korban aluminium secara luas dapat digunakan dalam proteksi katoda terhadap struktur baja dalam media air laut. Kemudian dalam pengujiannya, kandungan Mg dapat berpengaruh terhadap perilaku dan efisiensi elektrokimia dalam konsentrasi yang berbeda dengan jarak 5,5 sampai 8,5 WT%. Dari pengujian elektrokimia tersebut dengan waktu yang singkat dapat dibuktikan bahwa dengan meningkatkan kandungan Mg maka akan

meningkatkan kapasitas paduan Al sehingga efisiensi sifat elektrokimia dapat diperoleh (Orozco,2005)

2.12. Karakteristik Bahan Anoda Korban Melalui Pengujian Laboratorium

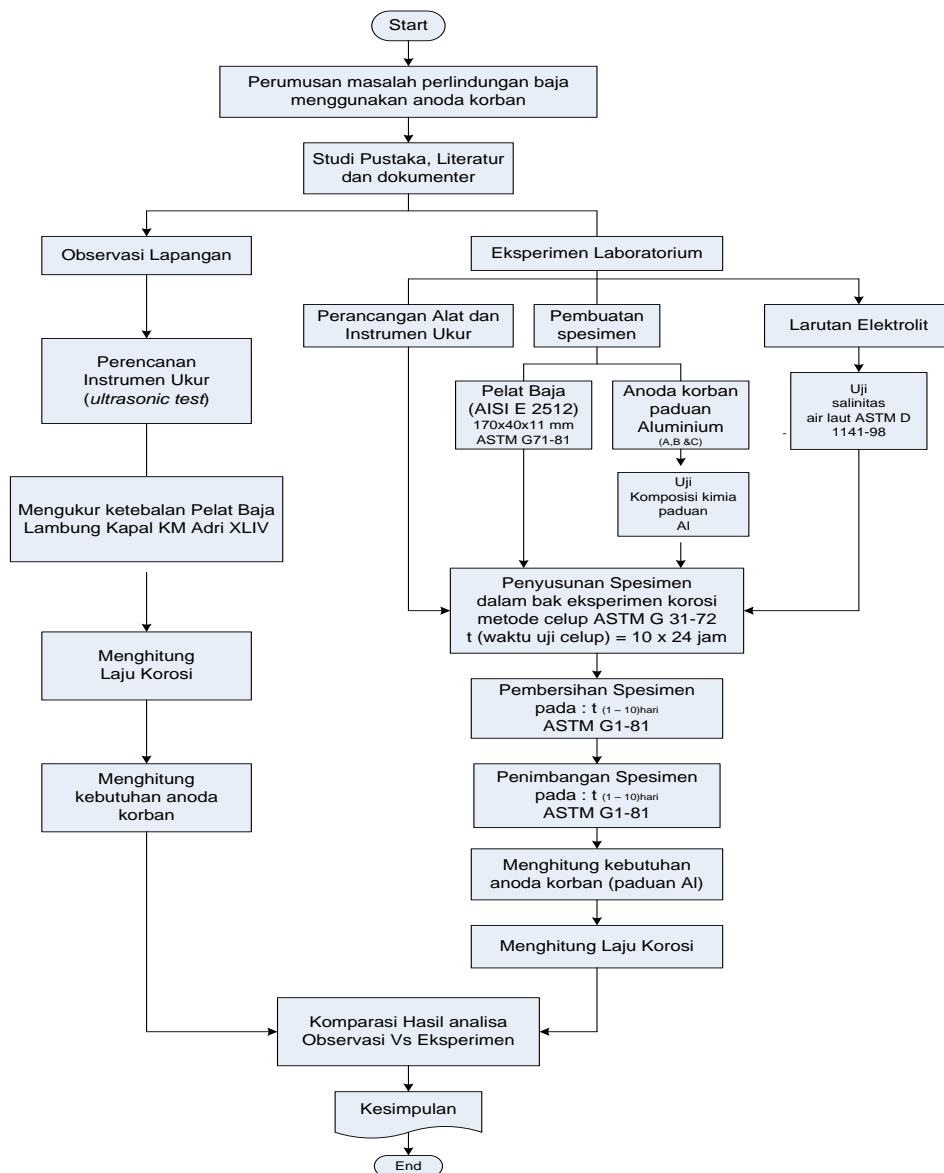
Karakteristik Bahan Anoda Korban Melalui Pengujian Laboratorium (*Characterization of Sacrificial Anode Materials Through Laboratory Testing*) secara umum menyebutkan bahwa pada anoda korban berbasis aluminium bentuk dari hasil korosi di atas permukaan anoda korban sangat mempengaruhi efisiensi elektrokimia dari material. Perilaku elektrokimia dari material anoda korban merupakan hal yang sangat penting untuk menguji ketahanan dan efisiensi sistem proteksi katoda terhadap struktur yang tidak terlindungi dalam lingkungan air laut. Secara khusus anoda korban terlindungi oleh hasil korosi, hal ini terlihat jelas bahwa efisiensi anoda korban dalam kondisi normal akan terpengaruh oleh tingkat hasil korosi dan cakupannya (Baard Espelid,1996).

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

3.1. Diagram Alir Penelitian

Penelitian ini menggunakan metoda observasi lapangan dan eksperimen laboratorium untuk memperoleh data dan parameter laju korosi pelat baja lambung kapal. Alur penelitian dapat dilihat dari diagram alir gambar.3.1.berikut .



Gambar.3.1. Diagram alir penelitian.

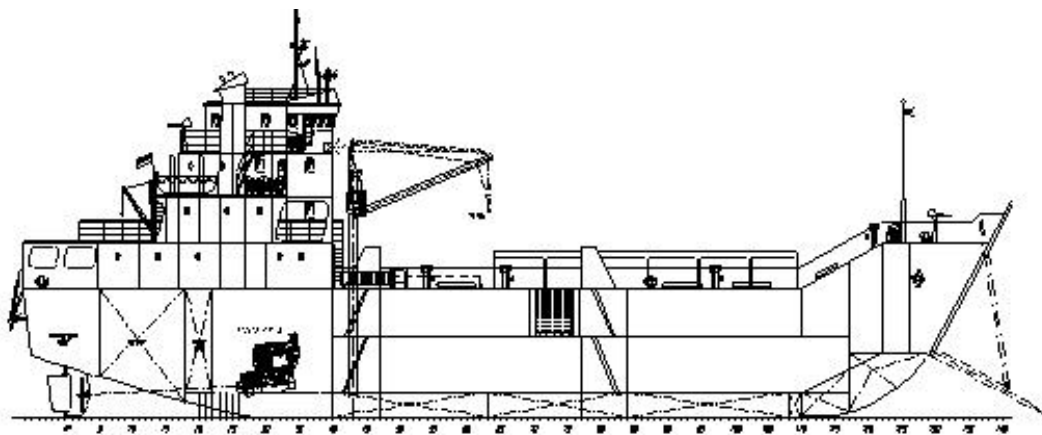
Tahap penelitian diawali dengan studi pustaka tentang korosi dan perlindungan pelat lambung kapal menggunakan anoda korban yang biasa dilakukan oleh pihak galangan kapal, khususnya saat melakukan penggantian dan pemasangan anoda korban (*replating*), kemudian mencari masukan dan informasi yang dibutuhkan dalam mengatasi masalah tersebut, baru kemudian ditetapkan langkah-langkah penelitian melalui metoda observasi lapangan dan eksperimen di laboratorium.

3.2. Observasi Lapangan

Observasi lapangan dilakukan untuk mendapatkan data ketebalan pelat baja lambung kapal.

3.2.1. Sampel Observasi

Sampel observasi adalah kapal General Cargo/LCT KM. ADRI XLIV, seperti terlihat pada Gambar.3.2, berikut ini.



Gambar.3.2. KM ADRI XLIV.

Ukuran utama :

- *Length Over All (Loa)* : 57,5 m
- *Length Between Perpendicular (Lbp)* : 51,6 m
- *Breadth (B)* : 13,5 m
- *Depth (H)* : 5 m
- *Draught (T)* : 2,20 m

Kapal mengalami penggantian anoda korban, dimana anoda korban yang sudah ada telah habis terkorosi. Anoda korban yang dipasang adalah anoda korban paduan aluminium dengan berat total 78 kg.

3.2.2. Instrumen Ukur

Instrumen ukur yang digunakan adalah *ultrasonic test*, alat ini digunakan untuk mengukur ketebalan pelat lambung kapal



Gambar.3.3. Alat ukur ketebalan pelat (*ultrasonic test*)

Spesifikasi teknis :

Jenis layar	LCD
Resolusi	0.001"/ 0.01 mm
Satuan	Metrik & Britis
Batas pengukuran	0.04 ~8.0" (1 ~200mm) standar
Batas kecepatan suara	1000 ~ 9999 m/s (3,280 ~32,805 ft/s)
Temperatur kerja	0 ° C ~ +50° C (32 ~122 F°)
Frekuensi	5 MHz

3.2.3. Lokasi Observasi

Lokasi observasi di dok dan galangan kapal PT. Jasa Marina Indah Pelabuhan Tanjung Emas Semarang, pada bulan Oktober 2008.

3.2.4.Data Observasi

Data observasi diperoleh melalui penempatan alat ukur (*ultrasonic test*) pada titik sesuai dengan gambar bukaan kulit (gambar bebaran pelat lambung kapal) pada Gambar.3.4. berikut, kemudian pengambilan ukuran ketebalan pelatnya sebagai data hasil observasi dicatat dalam tabel.3.1. sebagai berikut:

Tabel.3.1. Data observasi tebal pelat lambung kapal.

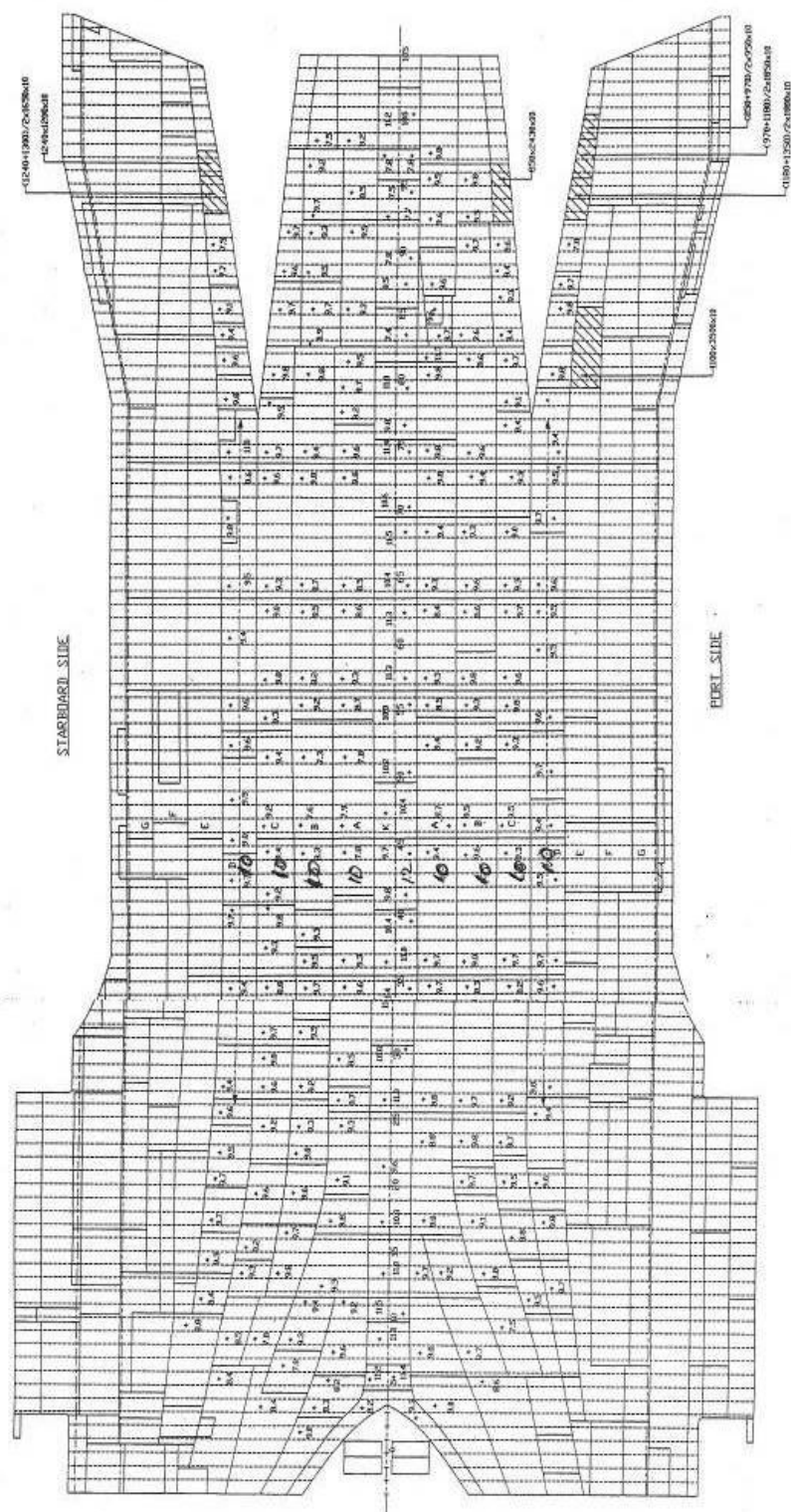
No.	Tebal Pelat Awal	Tebal Saat Tes Ultrasonic
1	t_o	t_a
2	t_o	t_a
.....	t_o	t_a
259	t_o	t_a

3.2.5.Menganalisa Data Observasi

Data hasil observasi ketebalan pelat lambung kapal yang masih tersisa dianalisa untuk menentukan laju korosi yang terjadi.

3.2.6.Menentukan Jumlah Anoda Korban

Setelah laju korosi diketahui kemudian dilakukan analisa jumlah anoda korban yang dipasang pada pelat lambung kapal.



Gambar.3.4. Titik-titik pengukuran pelat dengan *ultrasonic test*

3.3. Eksperimen Laboratorium

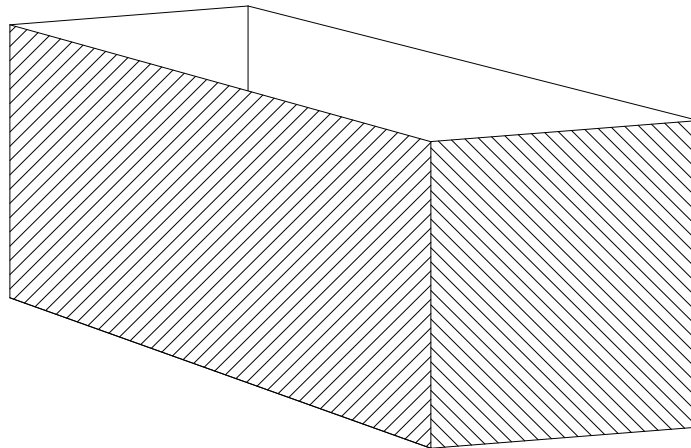
Eksperimen laboratorium dilakukan dengan uji celup (*immersion corrosion test of metal*) sesuai dengan standart test korosi metal dari ASTM G31-72 untuk memperoleh data korosi yang terjadi pada pelat baja dan anoda korban dengan menggunakan tiga macam anoda korban paduan aluminium yang berbeda.

3.3.1. Perancangan Alat

Alat yang digunakan dalam eksperimen laboratorium antara lain adalah :

a. Bak Plastik

Bak plastik (bak air) digunakan untuk menampung 40 liter larutan eletrolit (air laut) dengan ukuran 46,5 cm x 34,5 cm x 29,0 cm) sebanyak 3 buah, bentuk bak air dapat dilihat pada Gambar.3.5 berikut



Gambar.3.5. Bak plastik

b. Kayu Penjepit

Penjepit dari kayu ramın dengan ukuran 40,0 x 5,0 x 0,5 (cm) sebanyak 12 pasang yang digunakan untuk menjepit spesimen uji pelat baja yang akan dicelupkan ke dalam bak plastik

c. Baut dan Mur

Baut dan mur sejumlah 12 pasang digunakan untuk menahan jepitan spesimen uji agar tidak berubah posisi.

d.Pompa Air

Pompa air sebanyak 3 buah digunakan untuk memberikan efek gelombang dalam 3 buah bak plastik yang berisi larutan elektrolit (air laut) dengan spesifikasi : P 1800, 220/240, 50 hzt .

e.Solder Timah

Solder timah digunakan untuk menempelkan anoda korban paduan aluminium pada spesimen uji pelat baja ditambah dengan bantuan getah pinus (gondorukem), peralatan solder, timah dan gondorukem.

f.Larutan NaOH, dan Aquades

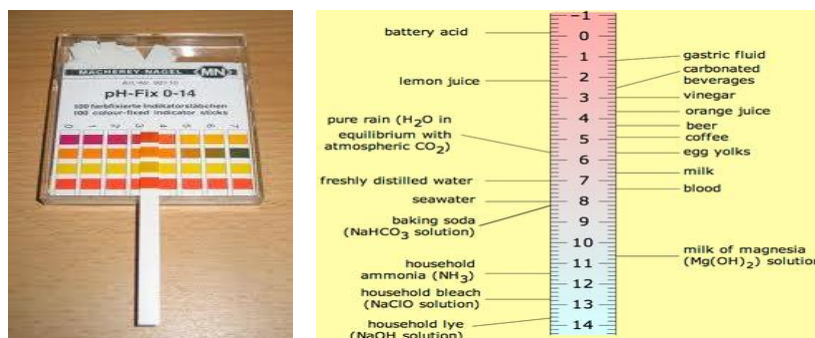
Larutan NaOH 10 % dan aquades digunakan sebagai bahan pembersih untuk membersihkan spesimen uji pelat baja dan anoda korban paduan aluminium sesuai dengan standart ASTM G.1-81, tentang *Standard Practice For Preparing, Cleaning, And Evaluating Corrosion Test Spesiment*.

3.3.2.Instrumen Ukur

Instrumen ukur yang digunakan dalam eksperimen laboratorium antara lain adalah :

a.pH Indikator

Indikator ini berupa kertas lakmus seperti gambar.3.6. dibawah ini.



Gambar.3.6. Kertas pH indikator

b.Jangka Sorong

Jangka sorong digunakan untuk mengukur dimensi spesimen dan mengukur pengurangan tebal spesimen, dengan ketelitian 0.001 inchi.

c. Mikrometer

Mikrometer digunakan untuk mengukur tebal spesimen uji, dengan tingkat ketelitian 0.01 mm.

d. Timbangan berat

Timbangan berat digunakan untuk mengukur berat spesimen uji pelat baja. Kapasitas maksimum 600 gram (ketelitian : 0,01 gram), dengan spesifikasi alat:

- Layar : LCD
- Tenaga baterai : DC 9V / 4 AA
- Resolusi : 0,01 gram
- Konversi unit : gram, oz

3.4. Material Spesimen Uji

3.4.1. Pelat Baja

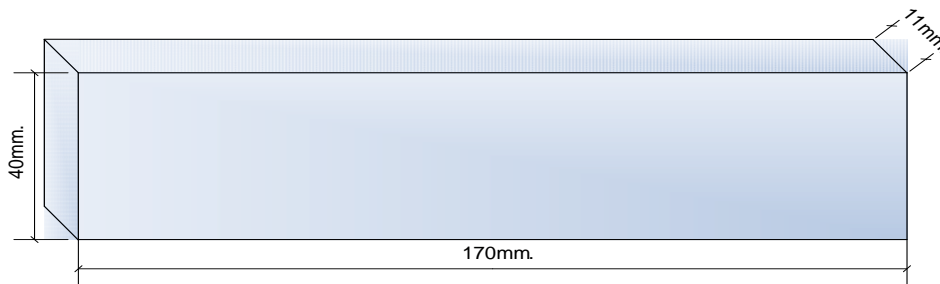
Spesimen uji adalah pelat baja *grade A* (BKI) setara dengan AISI E 2512 (E=kelas E, 25 = kandungan paduan Nikel (Ni) pada baja nominal 5,00%, 12 = kandungan paduan karbon (C) pada baja sebesar 0,12%). Pelat baja dipersiapkan dengan ukuran 170,0 mm x 40,0 mm x 11,0 mm (sejumlah 12 spesimen). Kemudian pelat baja (spesimen) dibersihkan untuk menghilangkan kotoran pada pelat baja agar terhindar dari terjadinya korosi awal, sesuai dengan standar ASTM G1-81, "*Standart Practice for Preparing, Cleaning, and Evaluating Corrosion Test Specimens*". Komposisi kimia pelat baja dan kekuatan tariknya dapat dilihat dalam tabel.3.2 dan 3.3 berikut.

Tabel 3.2. Komposisi kimia pelat baja (*Bureau Veritas, 2004*)

Unsur	Kadar Maks. (%)
C	0,140
Mn	0,660
P	0,026
S	0,017
Si	0,270
Ni	5,250

Tabel 3.3. Kekuatan tarik pelat baja(Bureau Veritas, 2004)

Kekuatan Tarik	
<i>Yield Strength</i> (YS)	308 N/mm ² - 327 N/mm ²
<i>Tensile Strength</i> (TS)	438 N/mm ² – 464 N/mm ²
<i>Elongation</i>	26-29 %



Gambar.3.7. Spesimen pelat baja (12 buah).

3.4.2. Anoda Korban

Kebutuhan berat anoda korban paduan aluminium dapat dihitung dengan persamaan : (Espelid, 1996)

$$M = \frac{I_c \times T \times 8760}{\mu \times \varepsilon} \quad (3.2)$$

dimana :

M = Berat Anoda Korban (kg)

I_c = Kebutuhan Arus Proteksi (Ampere)

$I_c = A_c \times f_c \times I_c \quad (3.3)$

T = Umur Proteksi (tahun)

$T = 3$ Tahun (Peraturan BKI)

μ = Faktor Guna Anoda Korban

$\mu = 0,85$ (Tabel)

ε = Electrochemical efficiency (Ah/kg)

$\varepsilon = 2000$, untuk paduan Aluminium

dimana :

A_c = Luas Pelat Baja yang diproteksi dengan Paduan Aluminium (m^2)

f_c = *Faktor Kerusakan Lapisan (tabel)*

$$f_c = k_1 + k_2 \frac{tf}{2} \quad \dots (\text{Ampere}) \quad (3.4)$$

dimana :

$k_1 = 0,02$ (mengacu pada DNV RPB401)

$k_2 = 0,015$ (mengacu pada DNV RPB401)

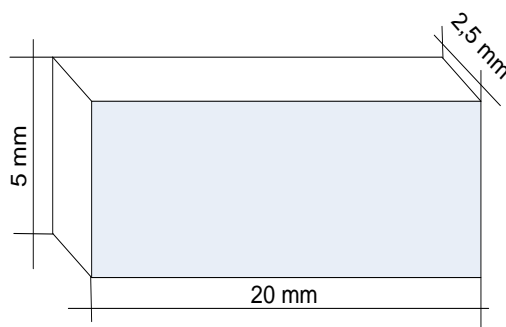
tf = Umur Proteksi = 3 tahun

$$f_c = 0,02 + 0,015 \times \frac{3}{2} = 0,02 + 0,0225 = 0,0425 \text{ Ampere}$$

i_c = *Arus Densitas rata-rata (A/m^2)*

$i_c = 0,100 \text{ Ampere}/m^2$ (tabel)

Anoda korban yang digunakan dalam eksperimen ini adalah anoda korban paduan Aluminium dengan ukuran 20,0 x 5,0 x 2,5 mm (berat 1,02 gram) dan komposisi paduan terdiri dari 3 macam seperti yang terdapat dalam Tabel.3.4. serta dimensi anoda korban paduan aluminium yang digunakan dapat dilihat dalam Gambar.3.8.



Gambar.3.8. Anoda korban paduan aluminium.

Tabel.3.4. Anoda korban paduan aluminium (Polman, 2009 & BKI, 2004).

Unsur	Anoda Korban Paduan Al (%)			
	Pd Kapal	Anoda A	Anoda B	Anoda C
Al	98,750	86,118	85,097	97,665
Si	0,006	0,298	0,2555	0,100
Fe	0,129	1,655	1,7863	0,100
Cu	0,001	0,0133	0,0134	0,005
Mn	0,008	0,078	0,0606	0,000
Zn	1,080	0,562	4,195	2,000
Mg	0,000	0,0115	0,0115	0,000
Ti	0,010	0,0263	0,0294	0,029
In	0	0	0	0,030
Sn	0	4,205	0,0378	0,000
Other	2,4	11,2481	8,5628	0,100
Potential(T=20°C)				-1,05 Volt
Qg(T=20°C)				2000 Ah/kg
Efficiency (T=20°C)				95%

3.4.3. Larutan Elektrolit

Larutan elektrolit yang digunakan adalah air laut dari laut Jawa yang telah sesuai dengan standar ASTM D1141-98 (*standard practice for the preparation of substitute ocean water*), dan volume air laut sebagai larutan elektrolit sesuai ASTM G71-81 (*standard guide for conducting and evaluating galvanic corrosion test in electrolytes*) adalah 40 cm³ : 1 cm²

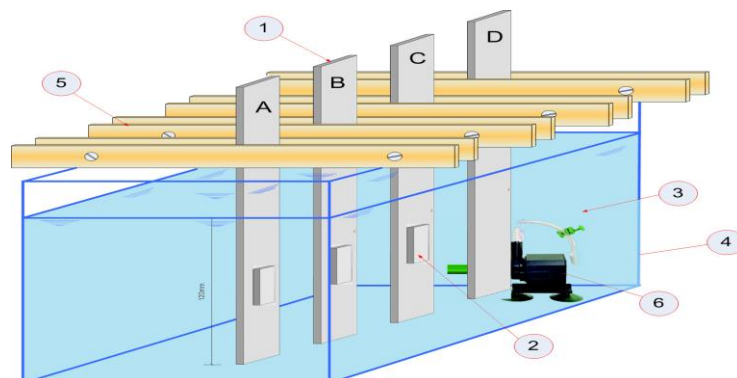
baja yang tercelup. Kandungan garam yang terlarut dalam air laut, dapat dilihat dalam Tabel.3.5.

Tabel 3.5. Kandungan garam terlarut (gram/l) dalam air laut
(Laboratorium Terpadu Ilmu Kelautan, Undip, 2009)

Garam	Salinitas (‰)
	37
<i>NaCl</i>	25.93
<i>MgCl₂</i>	5.497
<i>Na₂SO₄</i>	4.090
<i>CaCl₂</i>	1.230
<i>KCl</i>	0.735
<i>NaHCO₃</i>	0.201
<i>KBr</i>	0.101
<i>H₃BO₃</i>	0.027
<i>SrCl₂</i>	0.026
<i>NaF</i>	0.003

3.4.4. Susunan Spesimen Uji

Dalam eksperimen laboratorium ini susunan spesimen dibagi dalam 3 bak plastik (bak air laut), masing-masing spesimen dijepit dengan kayu dan ditempatkan di atas mulut bak air laut dengan bagian yang tercelup 12 cm, seperti Gambar.3.9.



Keterangan gambar :

1. Spesimen pelat baja

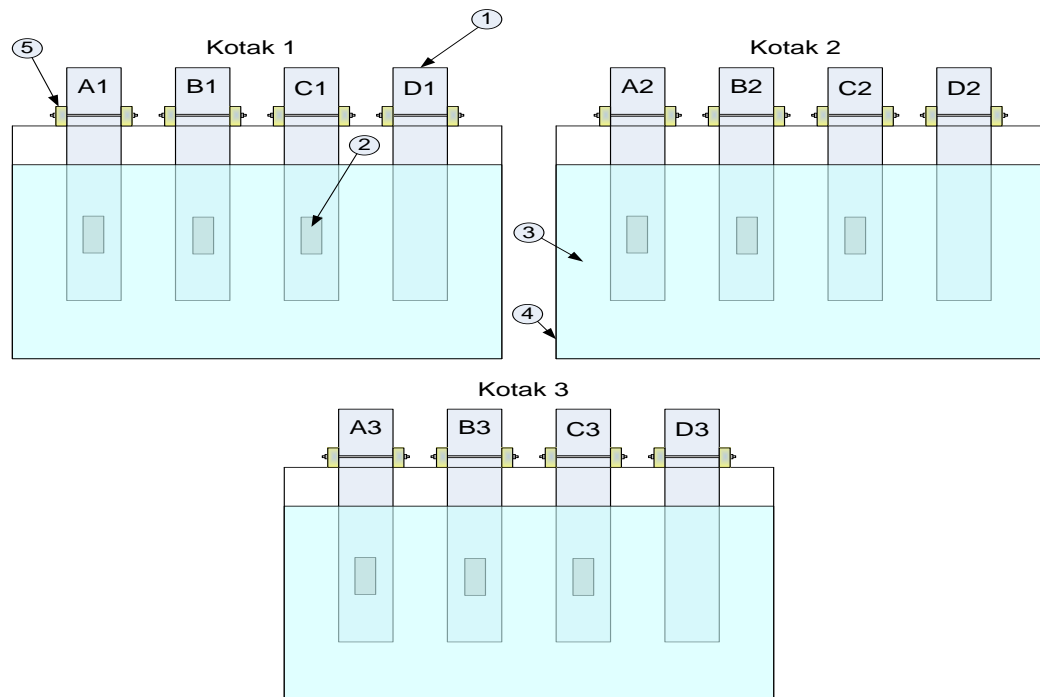
3. Air laut

5. Kayu penjepit

2. Anoda korban 4. Kotak(bak) air laut 6. pompa air

Gambar.3.9. Bak air laut untuk pengujian korosi.

Susunan spesimen uji celup berdasarkan Gambar 3.10.



Gambar.3.10. Susunan spesimen uji dalam bak air laut.

Spesimen A : Pelat baja dengan anoda korban Al komposisi paduan Polman A

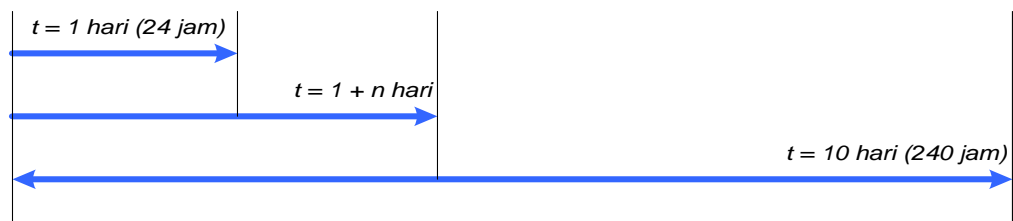
Spesimen B : Pelat baja dengan anoda korban Al komposisi paduan Polman B

Spesimen C : Pelat baja dengan anoda korban Al spesifikasi BKI KI-AL1

Spesimen D : Pelat baja tanpa anoda korban

3.4.5. Waktu Uji Celup.

Waktu uji celup yang digunakan dalam pengujian korosi, dilakukan berdasarkan standard ASTM G 31-72 (*standard recommended practice for laboratory immersion corrosion testing of metal*) selama 240 jam (Tsai,1996) dengan interval 24 jam, 48 jam, 96 jam, 144 jam, 192 jam dan 240 jam. Diagram waktu uji celup terlihat pada Gambar.3.11 berikut.



Gambar.3.11. Waktu pelaksanaan uji celup.

3.4.6. Pengambilan Data

Pengambilan data penurunan berat dengan jalan penimbangan spesimen (pelat baja) dengan periode tiap 48 jam, kecuali hari pertama dengan periode 24 jam. Sebelum penimbangan spesimen terlebih dahulu dibersihkan. Perlakuan selama pembersihan adalah dengan jalan mencelupkan spesimen dalam larutan NaOH 10% selama 5 menit, kemudian diangkat dan dicelupkan dalam aquades selama 5 menit kemudian dikeringkan dengan *Oven*, baru dilakukan penimbangan dan data dicatat dalam tabel.3.6, berikut:

Tabel.3.6. Data penurunan berat pelat baja.

No.	Periode	Kotak 1 (gram)				Kotak 2 (gram)			
		Spesimen (pelat baja)				Spesimen (pelat baja)			
		Anoda Al			tanpa	Anoda Al			tanpa
		A1	B1	C1	D1	A2	B2	C2	D2
1	t ₁	A _{w1}	B _{w1}	C _{w1}	D _{w1}	A _{w2}	B _{w2}	C _{w2}	D _{w2}
2	t ₂	A _{w1}	B _{w1}	C _{w1}	D _{w1}	A _{w2}	B _{w2}	C _{w2}	D _{w2}
3	t ₄	A _{w1}	B _{w1}	C _{w1}	D _{w1}	A _{w2}	B _{w2}	C _{w2}	D _{w2}
4	t ₆	A _{w1}	B _{w1}	C _{w1}	D _{w1}	A _{w2}	B _{w2}	C _{w2}	D _{w2}
5	t ₈	A _{w1}	B _{w1}	C _{w1}	D _{w1}	A _{w2}	B _{w2}	C _{w2}	D _{w2}
6	t ₁₀	A _{w1}	B _{w1}	C _{w1}	D _{w1}	A _{w2}	B _{w2}	C _{w2}	D _{w2}

Sambungan Tabel.3.6

No.	Periode	Kotak 3 (gram)			
		Spesimen (pelat baja)			
		Anoda Al			tanpa
		A3	B3	C3	D3
1	t ₁	A _{w3}	B _{w3}	C _{w3}	D _{w3}
2	t ₂	A _{w3}	B _{w3}	C _{w3}	D _{w3}
3	t ₄	A _{w3}	B _{w3}	C _{w3}	D _{w3}
4	t ₆	A _{w3}	B _{w3}	C _{w3}	D _{w3}
5	t ₈	A _{w3}	B _{w3}	C _{w3}	D _{w3}
6	t ₁₀	A _{w3}	B _{w3}	C _{w3}	D _{w3}

3.5. Perhitungan Laju Korosi

Setelah data penurunan berat spesimen pelat baja dan anoda korban diperoleh maka selanjutnya dilakukan perhitungan laju korosi yang dapat dinyatakan dalam rumus sebagai berikut (Trethewey, 1991):

$$CR = \frac{K \times W}{A \times D \times T} \quad (3.1)$$

dimana : CR = Laju korosi (mm/th)

W = Massa yang terkorosi (gram)

A = Luas tercelup (cm²)

K = Konstanta 8.76×10^4

T = Waktu (jam)

D = Densitas (gram/cm³) untuk baja = 7,83 gram/cm³

3.6. Perbandingan Laju Korosi Hasil Eksperimen Laboratorium

Membandingkan laju korosi hasil eksperimen di laboratorium menggunakan tiga macam anoda korban paduan aluminium dengan laju korosi hasil observasi di lapangan. Kemudian disusun kesimpulan berdasarkan hasil perbandingan yang diperoleh sebagai kinerja anoda korban paduan aluminium yang akan dijadikan pertimbangan dalam memilih anoda korban paduan aluminium yang paling optimal untuk dipasang pada pelat baja lambung kapal.

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

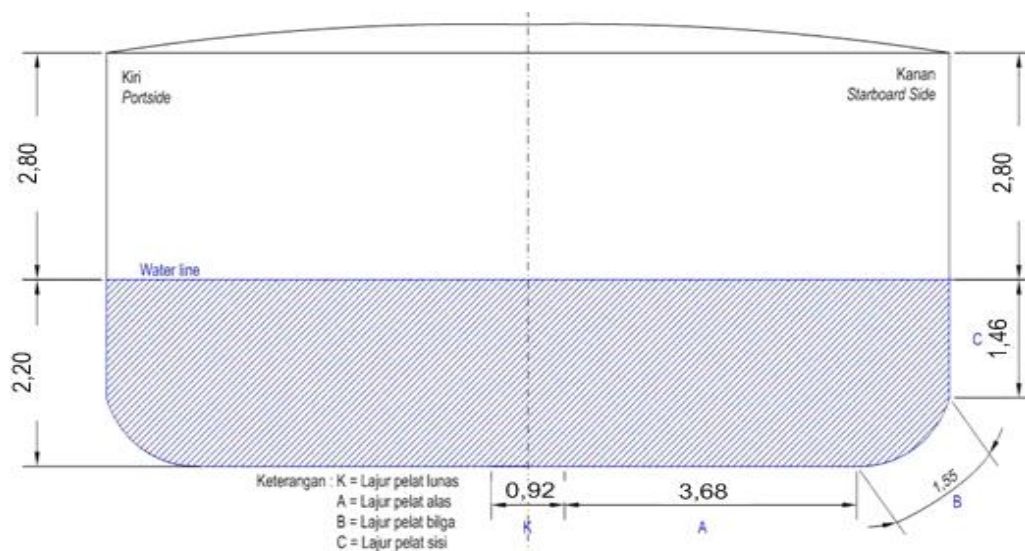
4.1. Data dan Analisa Observasi Lapangan

4.1.1. Hasil Pengukuran Tebal Pelat

Observasi dilakukan pada kapal KM. ADRI XLIV pada saat naik dok di PT. Jasa Marina Indah Semarang. KM. ADRI XLIV merupakan kapal *general cargo/ type LCT*, yang beroperasi di perairan laut Nusantara dengan salinitas air laut antara 33 ‰ sampai dengan 37 ‰, ukuran utama kapal :

- *Length Over All (Loa)* : 57,50 m
- *Length Between Perpendicular (Lbp)* : 51,60 m
- *Breadth (B)* : 13,50 m
- *Depth (H)* : 5,00 m
- *Draught (T)* : 2,20 m

Anoda korban paduan aluminium yang dipasang pada pelat lambung kapal sebanyak 30 buah x 2,60 kg = 78,0 kg. Lebar pelat lambung kapal sesuai dengan gambar. bukaan kulit yang terbagi dalam empat lajur pelat sebagaimana terlihat dalam Gambar.4.1, berikut :



Gambar.4.1. Potongan melintang KM ADRI XLIV

Pengukuran tebal pelat lambung kapal setelah kapal berlayar 3 tahun di perairan laut Nusantara, dilakukan dengan *ultrasonic test*, sebanyak 259 titik. Distribusi titik uji *ultrasonic test* secara vertikal, sebagai berikut :

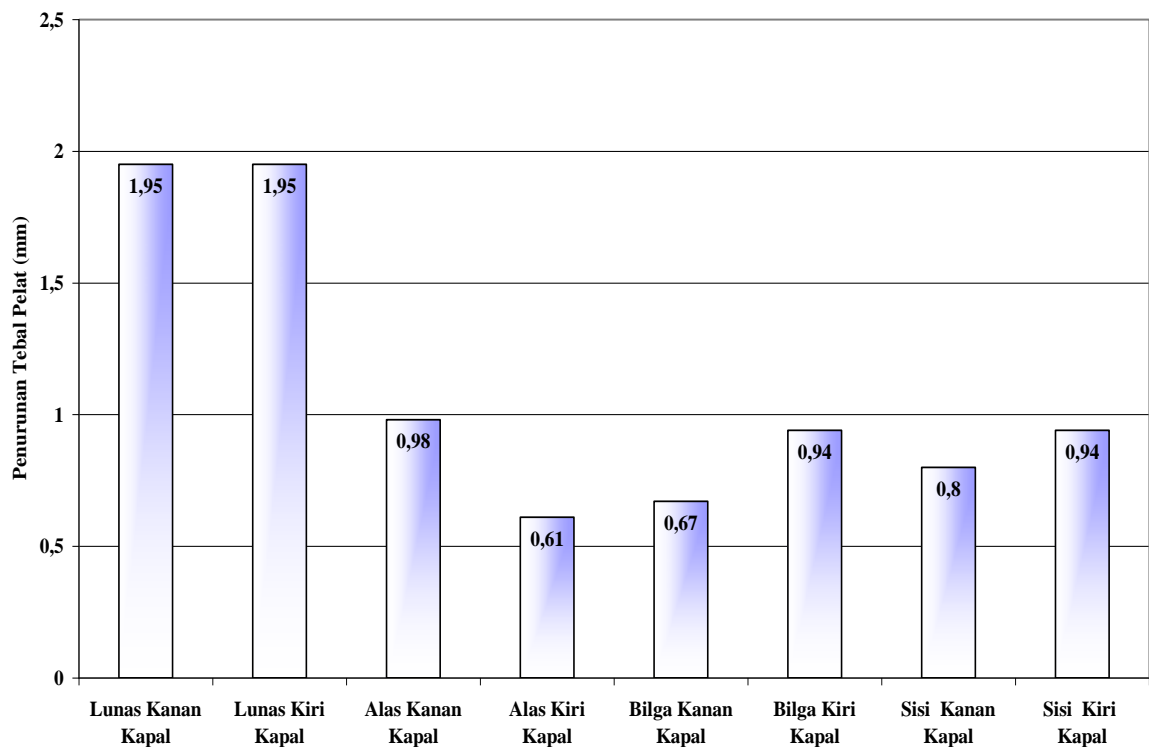
- a. Lajur pelat Lunas : 37 buah titik uji
- b. Lajur pelat Alas : 117 buah titik uji (61 kiri dan 54 kanan)
- c. Lajur pelat Bilga : 53 buah titik uji (27 kiri dan 26 kanan)
- d. Lajur pelat Sisi : 54 buah titik uji (27 kiri dan 27 kanan)

Data hasil pengukuran tebal pelat dapat dilihat dalam lampiran.9, sedangkan pengurangan tebal pada setiap lajur pelat lambung kapal dapat diketahui pada Tabel.4.1

Tabel.4.1. Pengurangan tebal lajur pelat lambung kapal.

NO	Lajur Pelat Lambung Kapal	Panjang, L (m)	Lebar, B (m)	Luas, A(m ²)	Tebal awal t_{R0} (mm)	Tebal akhir t_{R1} (mm)	Selisih tebal Δt_R (mm)
1	Lunas Kanan Kapal	51,60	0,92	47,47	12,00	10,50	1,95
2	Lunas Kiri Kapal	51,60	0,92	47,47	12,00	10,50	1,95
3	Alas Kanan Kapal	51,60	3,68	189,89	10,00	9,22	0,98
4	Alas Kiri Kapal	51,60	3,68	189,89	10,00	9,39	0,61
5	Bilga Kanan Kapal	51,60	1,55	79,98	10,00	9,33	0,67
6	Bilga Kiri Kapal	51,60	1,55	79,98	10,00	9,06	0,94
7	Sisi Kanan Kapal	51,60	1,46	75,34	10,00	9,20	0,80
8	Sisi Kiri Kapal	51,60	1,46	75,34	10,00	9,06	0,94
	Jumlah	-	15,22	785,35	84,00	76,26	8,84
	Rata-Rata	-	-	-	10,50	9,53	1,11

Penurunan atau pengurangan tebal pelat lambung kapal akibat korosi, berdasarkan arah vertikal kapal pada masing-masing lajur pelat kapal, KM.ADRI XLIV, seperti yang terlihat dalam Gambar.4.2, berikut.



Gambar.4.2. Diagram pengurangan tebal pelat lambung kapal akibat korosi

4.1.2. Hasil Perhitungan Laju Korosi

a. Laju Korosi Lajur Pelat Baja Secara Vertikal Kapal

Data hasil observasi lapangan terhadap KM ADRI XLIV, yang telah disusun di atas selanjutnya dilakukan perhitungan Laju Korosi pelat lambung kapal KM ADRI XLIV dengan, menggunakan persamaan berikut.

$$C_R = \frac{K \times W}{A \times D \times T} \text{ (mm/tahun)} \quad (4.5)$$

dimana :

K = Konstanta = $8,76 \times 10^4$

W = ΔW = Selisih berat awal dan berat akhir (gram)

A = Luas pelat lambung kapal yang tercelup air laut (cm^2)

D = Densitas pelat baja = $7,83 \text{ (gram/cm}^3\text{)}$

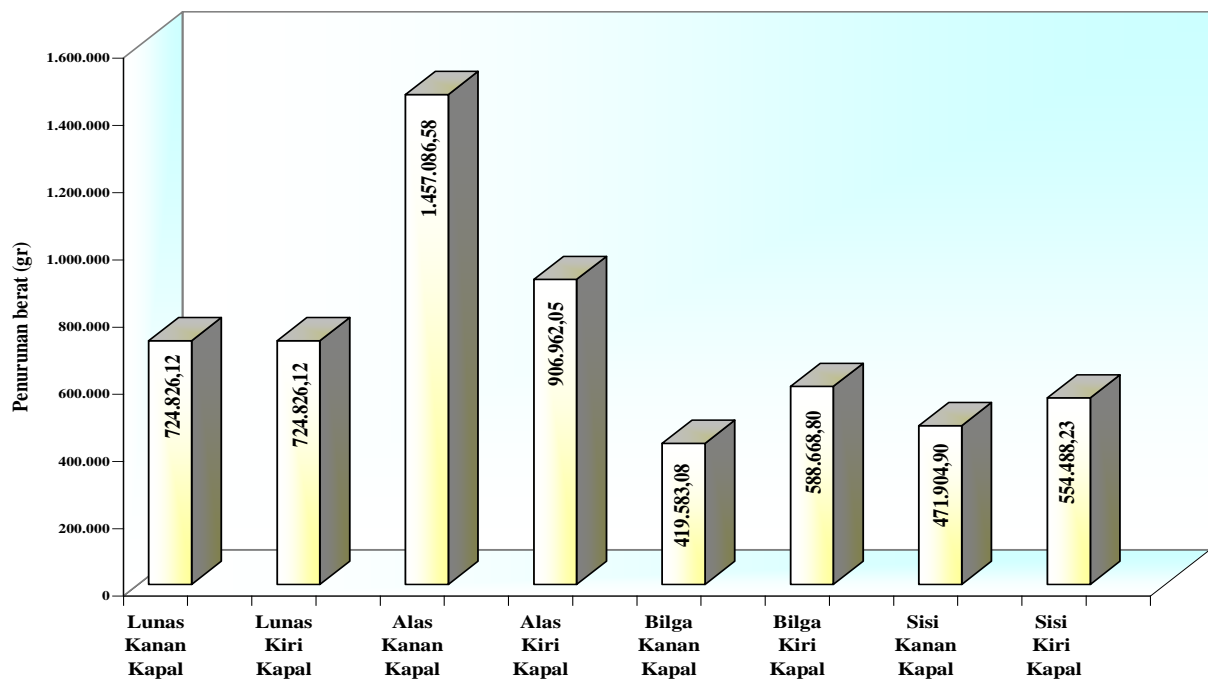
T = Umur proteksi (jam)

Penurunan berat pelat lambung kapal setelah tiga tahun berlayar, dapat dilihat dalam Tabel.4.2. berikut ini .

Tabel.4.2. Penurunan berat dan laju korosi lajur pelat lambung kapal

NO	Lajur Pelat Lambung Kapal	Berat awal, W_0 (gram)	Berat akhir, W_1 (gram)	Selisih berat, ΔW (gram)	Luas Pelat $A(m^2)$	Laju korosi C_R (mm/th)
1	Lunas Kanan Kapal	4.460.469,12	3.735.643,00	724.826,12	47,47	0,650
2	Lunas Kiri Kapal	4.460.469,12	3.735.643,00	724.826,12	47,47	0,650
3	Alas Kanan Kapal	14.868,230,40	13.411,143,82	1.457.086,58	189,89	0,313
4	Alas Kiri Kapal	14.868,230,40	13.961.268,35	906.962,05	189,89	0,203
5	Bilga Kanan Kapal	6.262.434,00	5.842.850,92	419.583,08	79,98	0,214
6	Bilga Kiri Kapal	6.262.434,00	5.673.765,20	588.668,80	79,98	0,301
7	Sisi Kanan Kapal	5.898.809,00	5.426.904,10	471.904,90	75,34	0,256
8	Sisi Kiri Kapal	5.898.809,00	5.344.320,77	554.488,23	75,34	0,295
Lambung Kapal Total		62.979.885,04	57.131.539,16	5.848.345,88	785,35	0,304

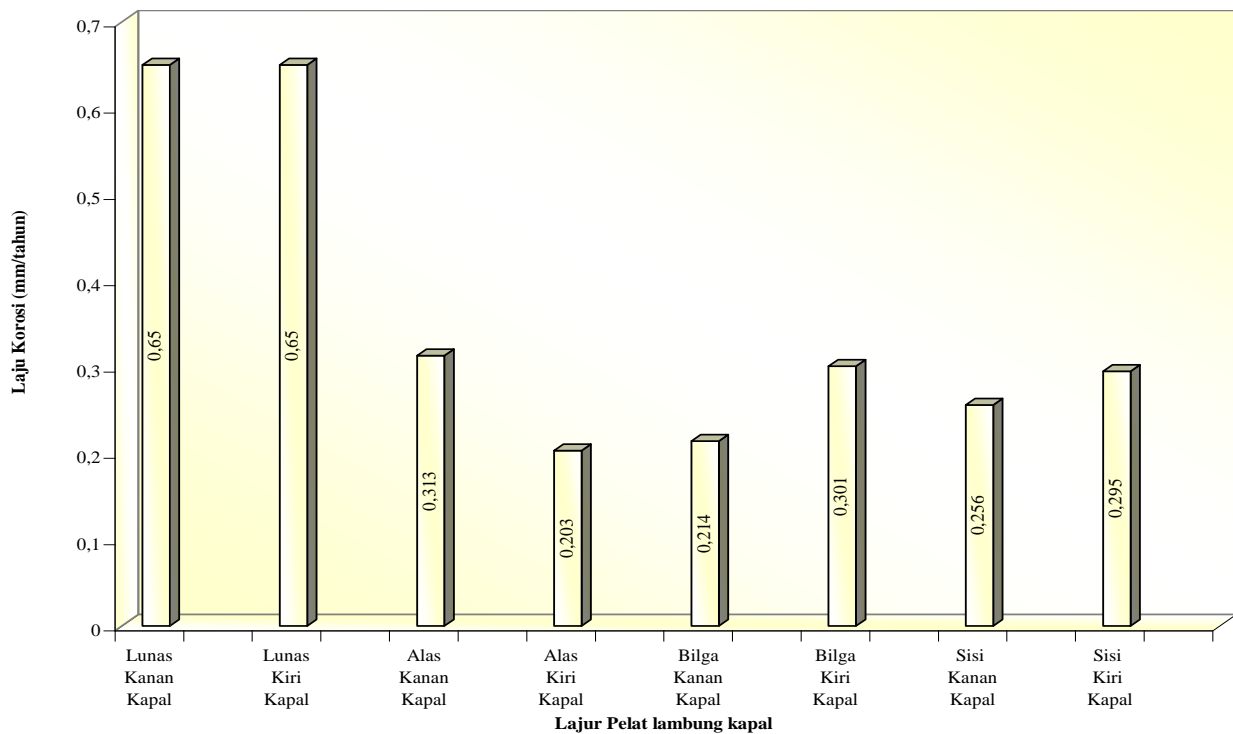
Penurunan berat pelat lambung terbanyak pada lajur alas kapal, dimana memiliki luas yang terbesar dari pembagian lajur pelat kapal. Perbedaan penurunan berat pelat dapat dilihat dalam Gambar..4.3, berikut.



Gambar.4.3. Diagram penurunan berat lajur pelat lambung secara vertikal kapal.

Data berat awal lajur pelat lambung kapal keseluruhan adalah 62.979.885,040 kg. Setelah dilakukan pengukuran tebal pelat pada kapal setelah 3 tahun berlayar, berat akhir pelat lambung kapal, menjadi 57.131.539,160 kg sehingga terjadi penurunan berat sebesar : 5.848.345,880 kg atau 1,95 ton/tahun.

Laju korosi untuk masing-masing lajur pelat lambung kapal dapat dilihat dalam Gambar.4.4, berikut.



Gambar.4.4. Diagram laju korosi secara vertikal pelat lambung kapal.

Laju korosi yang tidak merata disebabkan oleh banyak hal: antara lain jumlah *bio fouling* yang menempel di pelat kapal tidak merata, kemudian kualitas anoda yang dipasang juga tidak sama, dan posisi pemasangan anoda, yang menunjukkan kerapatan anoda tiap meter luas pelat yang dilindungi, belum sesuai, terjadinya benturan pelat dengan dasar laut maupun pelat dengan dermaga sehingga pelat pesok atau rusak juga dapat meningkatkan laju korosi. Hal-hal diatas perlu dilakukan observasi lebih lanjut.

Laju korosi yang dialami pelat lambung kapal KM ADRI XLIV seperti yang terlihat dalam Tabel. 4.2. diatas masih dalam batas toleransi sesuai dengan peraturan Biro Klasifikasi Indonesia (BKI, Volume II, Section 3-K1.1) :

1. Batas korosi, $tk = 1,5 \text{ mm}$ untuk tebal pelat $t \leq 10 \text{ mm}$
2. Batas korosi, $tk = \frac{0,1t}{\sqrt{K}} + 0,5 \text{ mm} \dots \max 3,0 \text{ mm}$ $t > 10 \text{ mm}$

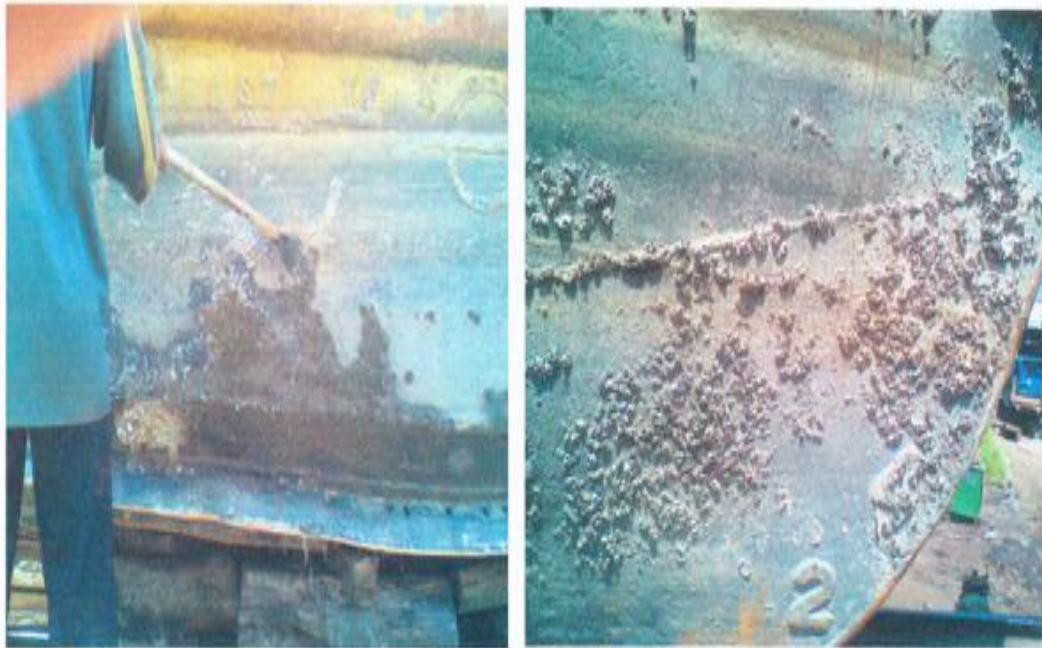
Dimana : K = Faktor bahan (0,9 s/d 1,0)

Titik kritis dari BKI, untuk tebal pelat > 10 mm adalah maksimum pengurangan tebal pelat 3,00 mm, dari hasil observasi pengurangan tebal pelat baja kapal rata-rata adalah 1,11 mm dan maksimum 1,95 mm, sehingga masih dalam batas toleransi ($< 3,00$ mm).

Untuk nomor uji *ultrasonic test* : 29-36 (pelat lunas haluan kapal) pengurangan tebal pelat sampai lebih 3,0 mm (12,0 mm- 7,5 mm = 4,5 mm). Nomor uji *ultrasonic test* : 152 (pelat sisi kanan haluan kapal, 10,0 mm -5,0 mm= 5,0 mm), Nomor uji *ultrasonic test* : 255 (pelat sisi kiri haluan kapal, 10 mm- 5,7 mm = 4,3 mm) sehingga perlu dilakukan penggantian pelat karena pengurangan tebal pelat lebih dari 3,0 mm, untuk pelat lunas diganti dengan pelat 12,0 mm dan pelat sisi dengan pelat 10,0 mm.

Penurunan berat pelat lambung kapal terjadi karena korosi pada pelat yang tercelup dalam air laut dan korosi ini di percepat dengan adanya arus laut maupun saat kapal berlayar akan menciptakan gelombang yang membentur dibadan kapal, sehingga memperbanyak jumlah oksigen bebas. Disamping air laut merupakan media yang sangat korosif bagi pelat lambung kapal pada bagian alas kapal juga terjadi korosi karena terdapat hewan laut yang menempel/*fouling* (korosi karena proses biologis dalam air laut, Gambar.4.5). *Bio fouling* merupakan mikro organisme bersel satu yang menempel dan berkembang biak pada pelat lambung kapal, sehingga akan meningkatkan terjadinya korosi.

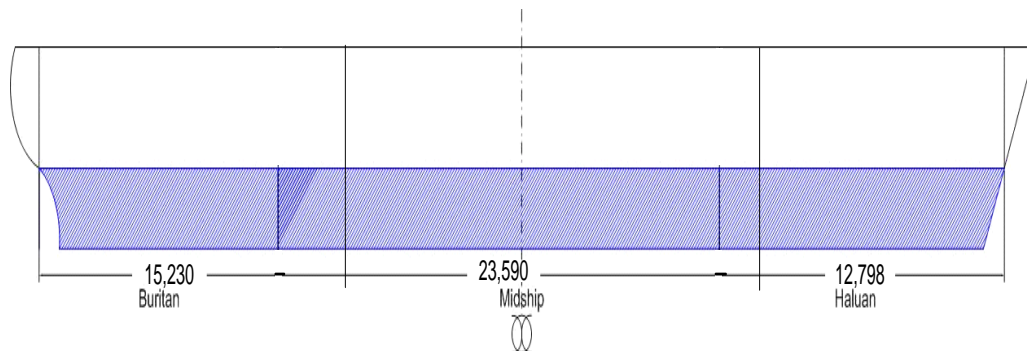
Pengaruh *bio fouling* (mikro organisme bersel satu) yang menempel pada pelat tidak merata. Proses korosi yang terjadi akibat pertukaran zat yang akan menghasilkan zat agresif, seperti : NH_4OH , CO_2 , H_2S . Pada reaksi elektrokimia terbentuk O_2 dan O_2 dari *chlorophile* akan membentuk sulfit atau sulfat yang akan meningkatkan laju korosi.



Gambar..4.5. Tumbuhan dan hewan laut yang menempel di pelat kapal/*fouling*.

b. Laju Korosi Pelat Baja Secara Longitudinal Kapal

Laju korosi pelat lambung kapal dapat ditinjau dari arah memanjang (*longitudinal*) kapal seperti Gambar.4.6. berikut.



Gambar..4.6. Pelat lambung arah memanjang kapal.

Distribusi titik uji *ultrasonict test* secara memanjang kapal adalah :

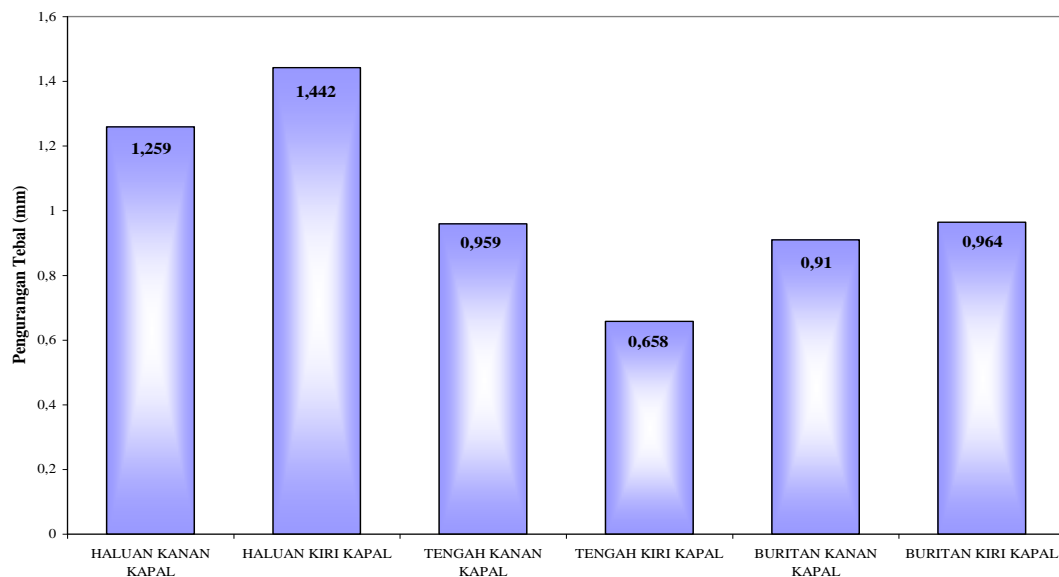
- a. Haluan : 62 buah titik uji (29 kanan dan 33 kiri)
- b. Tengah : 118 buah titik uji (59 kanan dan 59 kiri)
- c. Buritan : 79 buah titik uji (51 kanan dan 28 kiri)

Pengurangan tebal pelat lambung kapal jika ditinjau pada arah memanjang (*longitudinal*) kapal dapat dilihat dalam Tabel.4.3.

Tabel.4.3. Pengurangan tebal pelat lambung arah memanjang kapal.

No	Pelat Lambung Memanjang Kapal	Panjang L (m)	Luas A(m ²)	Tebal awal t _{R0} (mm)	Tebal akhir t _{R1} (mm)	Selisih tebal Δt _R (mm)
1	Haluan Kanan Kapal	12,78	97,22	10,35	9,09	1,26
2	Haluan Kiri Kapal	12,78	97,22	10,30	8,86	1,44
3	Tengah Kanan Kapal	23,59	179,46	10,27	9,31	0,96
4	Tengah Kiri Kapal	23,59	179,46	10,27	9,61	0,66
5	Buritan Kanan Kapal	15,23	115,86	10,24	9,33	0,91
6	Buritan Kiri Kapal	15,23	115,86	10,36	9,39	0,96
	Jumlah	51,60	785,09	61,78	55,59	6,19
	Rata-Rata			10,30	9,27	1,03

Tebal awal pelat rata-rata : 10,30 mm, dan tebal akhir 9,27 mm, terdapat pengurangan tebal sebesar 1,03 mm, pengurangan ini masih dibawah 3,00 mm. Pengurangan tebal pelat paling banyak pada bagian haluan kapal seperti terlihat dalam Gambar. 4.7, dibawah ini.



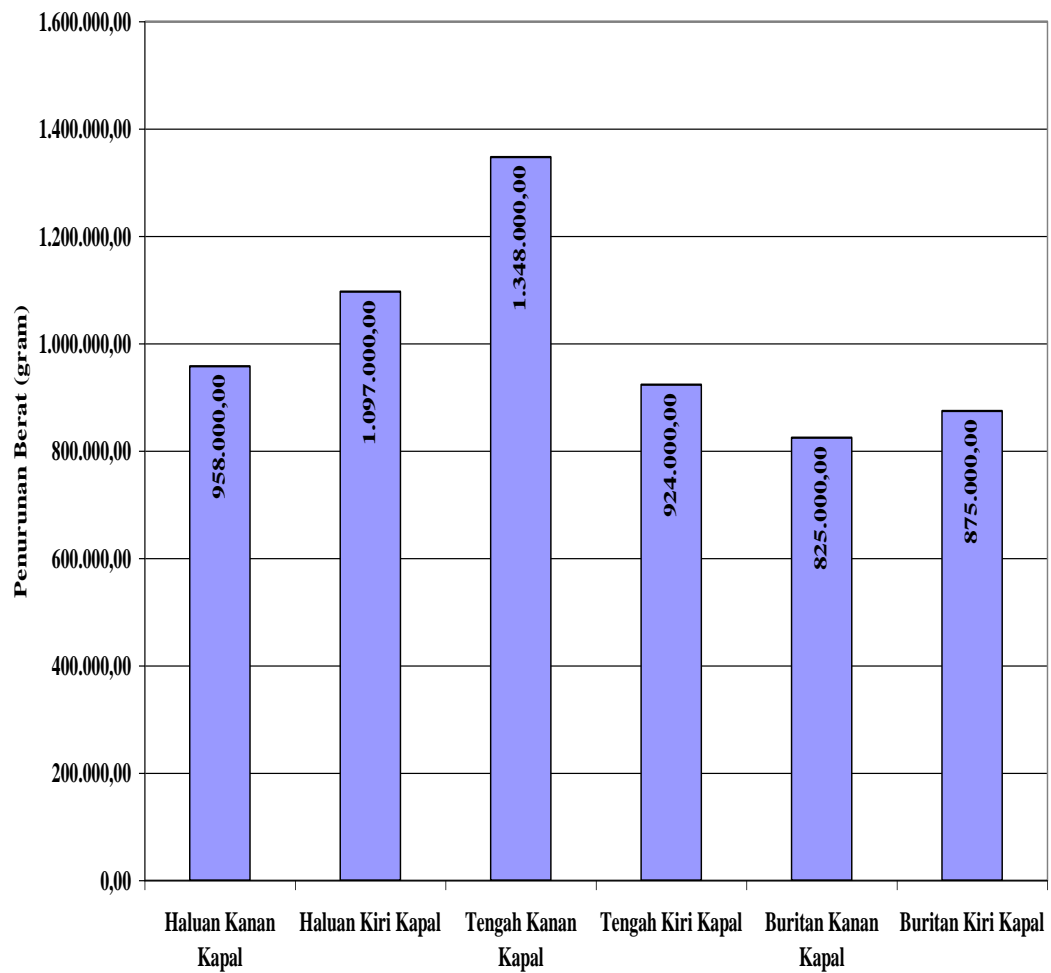
Gambar..4.7. Pengurangan tebal pelat lambung arah memanjang kapal.

Distribusi laju korosi ke arah memanjang pelat lambung kapal, dapat dilihat pada Tabel.4.4.

Tabel.4.4. Penurunan berat dan laju korosi lambung arah memanjang kapal.

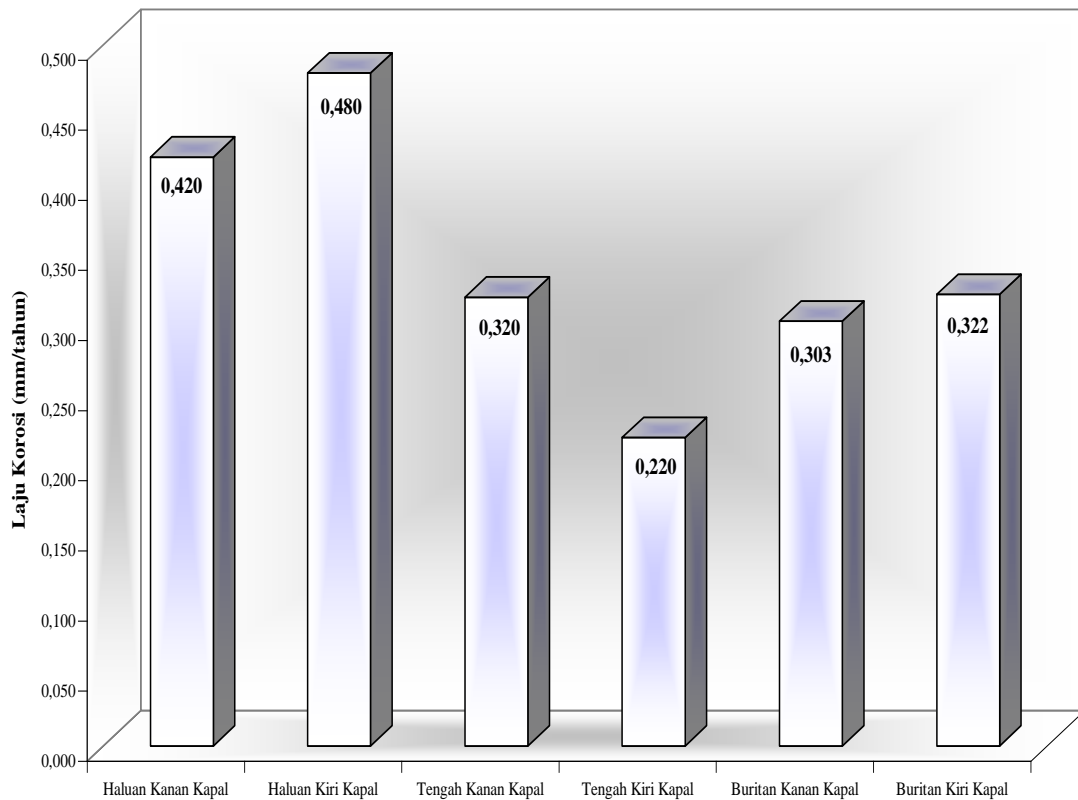
No	Bagian Lambung Kapal	Berat awal	Berat akhir	Selisih berat	Laju Korosi
		W_0 (gram)	W_1 (gram)	ΔW (gram)	CR (mm/th)
1	Haluan Kanan Kapal	7.875.000,000	6.917.000,000	958.000,000	0,420
2	Haluan Kiri Kapal	7.843.000,000	6.746.000,000	1.097.000,000	0,480
3	Tengah Kanan Kapal	14.433.000,000	13.085.000,000	1.348.000,000	0,320
4	Tengah Kiri Kapal	14.433.000,000	13.509.000,000	924.000,000	0,220
5	Buritan Kanan Kapal	9.285.000,000	8.460.000,000	825.000,000	0,303
6	Buritan Kiri Kapal	9.396.000,000	8.521.000,000	875.000,000	0,322
Pelat Lambung Kapal Total		63.265.000,000	57.238.000,000	6.027.000,000	
Rata - rata					0,327

Berat awal pelat lambung kapal jika ditinjau pada arah memanjang kapal adalah : 63,265 ton dan berat akhir pelat lambung kapal setelah di uji *ultrasonict test* adalah : 57,238 ton, sehingga terdapat penurunan berat sebesar 6,027 ton. Penurunan berat pelat lambung secara memanjang kapal, dapat dilihat dalam Gambar.4.8.



Gambar.4.8. Diagram penurunan berat pelat lambung secara memanjang kapal.

Laju korosi arah memanjang (*longitudinal*) kapal dapat dilihat dalam Gambar. 4.9. berikut ini.



Gambar.4.9. Laju korosi pelat lambung arah memanjang kapal

Laju korosi tertinggi pada daerah haluan kapal kemudian daerah buritan dan terendah daerah tengah kapal. Hal ini disebabkan oleh gelombang yang tercipta saat kapal berlayar, yang membentur daerah haluan kapal sehingga menghasilkan gelembung udara dengan jumlah oksigen tinggi dibandingkan daerah tengah dan buritan kapal. Pada daerah buritan laju korosi meningkat lagi akibat terbentuknya lapisan turbulen aliran fluida disekitar badan kapal yang juga meningkatkan kandungan oksigen di daerah tersebut. Laju korosi di daerah kiri dan kanan tidak merata juga akibat pertumbuhan *bio fouling* yang tidak sama antara daerah kiri dan kanan kapal.

4.1.3. Hasil Perhitungan Kebutuhan Anoda Korban

a. Berat Anoda korban

Kebutuhan anoda korban pada kapal KM ADRI XLIV, dengan anoda korban yang digunakan paduan aluminium (komposisi kimia paduan terdiri dari

Al : 98,75%, Si : 0,006% dan Cu : 0,001%) dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$M = \frac{I_c \times T \times 8760}{\mu \times \varepsilon} \quad \dots(kg) \quad (4.6)$$

dimana :

M = Berat anoda korban paduan aluminium (kg)

I_c = Kebutuhan arus proteksi (Ampere)

T = Umur proteksi (tahun), $T = 3$ Tahun (Peraturan BKI)

μ = Faktor guna anoda korban, $\mu = 0,85$ (Tabel)

ε = *Electrochemical efficiency* (Ah/kg), $\varepsilon = 2000$, paduan aluminium

Kebutuhan arus proteksi :

$$I_c = A_c \times f_c \times i_c \quad (\text{Ampere}) \quad (4.7)$$

dimana :

A_c = Luas pelat lambung kapal yang diproteksi dengan paduan aluminium (m^2)

$$A_c = \{(2T) + B\} \times L_{pp} \times \rho \quad \dots(m^2) \quad (4.8)$$

dimana :

T = Sarat air kapal = 2,20 m

B = Lebar kapal = 13,50 m

L_{pp} = Panjang kapal = 51,60 m

ρ = Faktor efisiensi jenis kapal, $\rho = 0,85$ (untuk kapal *general cargo*)

$$A_c = \{(2 \times 2,2) + 13,5\} \times 51,6 \times 0,85$$

$$A_c = 785,094 \text{ m}^2$$

f_c = faktor kerusakan lapisan (tabel)

$$f_c = k_1 + k_2 \frac{tf}{2} \quad \dots(\text{Ampere}) \quad (4.9)$$

dimana :

$k_1 = 0,02$ (mengacu pada DNV RPB401)

$k_2 = 0,015$ (mengacu pada DNV RPB401)

tf = Umur Proteksi = 3 tahun

$$f_c = k_1 + k_2 \frac{tf}{2} = 0,02 + 0,015 \times \frac{3}{2} = 0,0425 \quad (\text{Ampere})$$

i_c = Arus Density rata-rata (Ampere/m²), $i_c = 0,100$ Ampere/m² (tabel)

Sehingga :

$$I_c = A_c \times f_c \times i_c = 785,094 \times 0,0425 \times 0,100 = 3,337 \text{ (Ampere)}$$

Maka berat anoda korban yang dibutuhkan :

$$M = \frac{I_c \times T \times 8760}{\mu \times \varepsilon} = \frac{3,337 \times 3 \times 8760}{0,85 \times 2000} = 51,586 \text{(kg)}$$

b. Jumlah Anoda korban

Anode korban yang dipasang adalah paduan aluminium dengan bentuk *elongated flush mounted* tipe AV – 320 dimensi anode 270 mm x 150 mm x 30 mm ($P \times L \times T$) dengan berat netto 2,6 kg. Jadi jumlah anoda korban yang dibutuhkan adalah:

$$\sum AK = \frac{M}{W_{AK}} \text{ ...(buah)} \quad (4.10)$$

dimana :

$\sum AK$ = Jumlah anoda korban

M = Berat anoda korban yang dibutuhkan

W_{AK} = berat per unit anoda korban, sehingga

$$\sum AK = \frac{M}{W_{AK}} = \frac{51,586 \text{ kg}}{2,6 \text{ kg}} = 19,84 \approx 20 \text{ ...(buah)}$$

Penambahan anoda korban 20 % untuk tempat – tempat kritis dan sebagai faktor keamanan, sehingga jumlah total anoda korban yang dipasang adalah :

$$\sum AK_{Total} = 20 \times 1,2 = 24 \text{ buah.}$$

c. Jarak antar anoda korban

Jumlah total anoda korban 24 buah, masing-masing dipasang 12 buah untuk bagian lambung kanan dan 12 buah lambung kiri. Sehingga jarak antar anoda korban adalah:

$$J_{AK} = \frac{L_{pp}}{\sum AK_{Total}} \text{ ...(m)} \quad (4.11)$$

Dimana : J_{AK} = Jarak antar anoda korban.

L_{pp} = Panjang kapal (m)

$\sum AK_{Total}$ = jumlah total anoda korban yang dipasang /2 =12 buah

$$J_{AK} = \frac{L_{pp}}{\sum AK_{Total}} = \frac{51,60}{24/2} = 4,30...(m)$$

Sesuai hasil perhitungan kebutuhan anoda korban di atas diperoleh gambaran bahwa jumlah anoda korban yang dipasang di lambung kapal lebih banyak (30 buah) dari pada jumlah yang diperoleh dari hasil perhitungan (24 buah). Sehingga dapat dikatakan bahwa pemasangan anoda korban paduan aluminium pada pelat lambung kapal telah melebihi kebutuhan dan telah sesuai dengan standar kelayakan yang berlaku.

Dalam penerapan di lapangan, anoda korban paduan aluminium yang dipasang pada pelat lambung kapal dalam media air laut ternyata telah dapat memperlambat laju korosi pelat lambung kapal. Dari hasil perhitungan pengurangan tebal pelat dan penurunan berat pelat, maka pemasangan anoda korban paduan aluminium pada pelat lambung kapal dapat memperlambat laju korosi dimana laju korosinya rata-rata menjadi sebesar 0,327 mm/tahun.

Berdasarkan hasil observasi di lapangan pada KM ADRI XLIV, dapat diketahui bahwa untuk memperlambat laju korosi pelat lambung kapal selama 3 tahun berlayar, dibutuhkan anoda korban paduan aluminium sebanyak 2,6 kg x 24 buah. Sedang penerapan di lapangan, anoda korban paduan aluminium yang telah di pasang pada pelat lambung kapal sebanyak 2,6 kg x 30 buah, sehingga pemasangan anoda korban paduan aluminium tersebut telah melebihi kebutuhan dan sesuai standar kelayakan yang berlaku.

Selanjutnya apabila pemasangan anoda korban disusun berdasarkan luas masing-masing lajur pelat pada lambung kapal maka dapat disusun kebutuhan anoda korban berdasarkan luas masing-masing lajur pelat lambung kapal, dengan perhitungan sebagai berikut.

1. Lajur pelat lunas kapal

$$M = \frac{I_c \times T \times 8760}{\mu \times \varepsilon} = \frac{Ac \times f_c \times ic \times 3 \times 8760}{0,85 \times 2000} = \frac{94,94 \times 0,0425 \times 0,10 \times 3 \times 8760}{0,85 \times 2000} = 6,238...(kg)$$

2. Pelat lajur alas kapal (kanan dan kiri)

$$M = \frac{Ac \times fc \times ic \times 3 \times 8760}{0,85 \times 2000} = \frac{189,89 \times 0,0425 \times 0,10 \times 3 \times 8760}{0,85 \times 2000} = 12,476....(kg)$$

3. Pelat lajur bilga kapal (kanan dan kiri)

$$M = \frac{Ac \times fc \times ic \times 3 \times 8760}{0,85 \times 2000} = \frac{79,98 \times 0,0425 \times 0,10 \times 3 \times 8760}{0,85 \times 2000} = 5,255....(kg)$$

4. Pelat lajur sisi kapal (kanan dan kiri)

$$M = \frac{Ac \times fc \times ic \times 3 \times 8760}{0,85 \times 2000} = \frac{75,34 \times 0,0425 \times 0,10 \times 3 \times 8760}{0,85 \times 2000} = 4,95....(kg)$$

Sehingga berat anoda korban yang dibutuhkan per lajur pelat dapat dilihat dalam Tabel 4.5, berikut.

Tabel.4.5. Kebutuhan berat anoda korban

No.	Bagian lambung kapal	Berat (kg)
1	Pelat lajur lunas	6,24
2	Pelat lajur alas kanan	12,48
3	Pelat lajur alas kiri	12,48
4	Pelat lajur bilga kanan	5,29
5	Pelat lajur bilga kiri	5,29
6	Pelat lajur sisi kanan	4,95
7	Pelat lajur sisi kiri	4,95
	Jumlah total	51,66

Jumlah total berat anoda korban pelat lambung kapal adalah = 51,66 kg. Ukuran anoda korban yang dipakai dengan spesifikasi :

- Paduan aluminium
- Bentuk *elongated flush mounted* AJR AV- 320
- Dimensi anoda : 270 x 150 x 50 mm
- Berat netto : 2,60 kg

Jadi jumlah anoda korban yang dibutuhkan dapat dilihat dalam Tabel.4.6. berikut.

Tabel.4.6. Jumlah anoda korban yang dibutuhkan.

No.	Bagian lambung kapal	Jumlah (buah)
1	Pelat lajur lunas	3
2	Pelat lajur alas kanan	5
3	Pelat lajur alas kiri	5
4	Pelat lajur bilga kanan	2
5	Pelat lajur bilga kiri	2
6	Pelat lajur sisi kanan	2
7	Pelat lajur sisi kiri	2
Jumlah total		21

Penambahan 20% untuk faktor kritis dan faktor keamanan, sehingga jumlah menjadi anoda korban yang harus dipasang dapat dilihat dalam Tabel.4.7.

Tabel.4.7. Penambahan 20% jumlah anoda korban yang dipasang.

No.	Bagian lambung kapal	Jumlah (buah)
1	Pelat lajur lunas	3
2	Pelat lajur alas kanan	6
3	Pelat lajur alas kiri	6
4	Pelat lajur bilga kanan	3
5	Pelat lajur bilga kiri	3
6	Pelat lajur sisi kanan	3

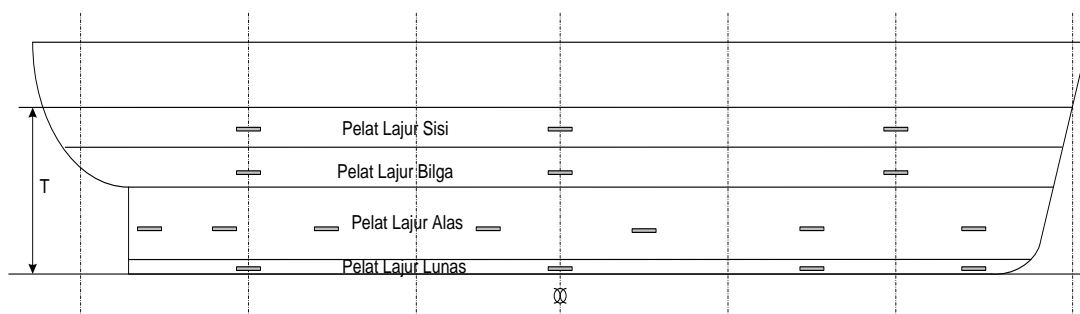
7	Pelat lajur sisi kiri	3
Jumlah total		27

Jumlah total, adalah : 27 buah anoda, Realisasi anoda korban yang dipasang adalah ; 30 buah. Jarak penempatan anoda korban pada lajur pelat lambung kapal dapat dilihat dalam Tabel.4.8, berikut.

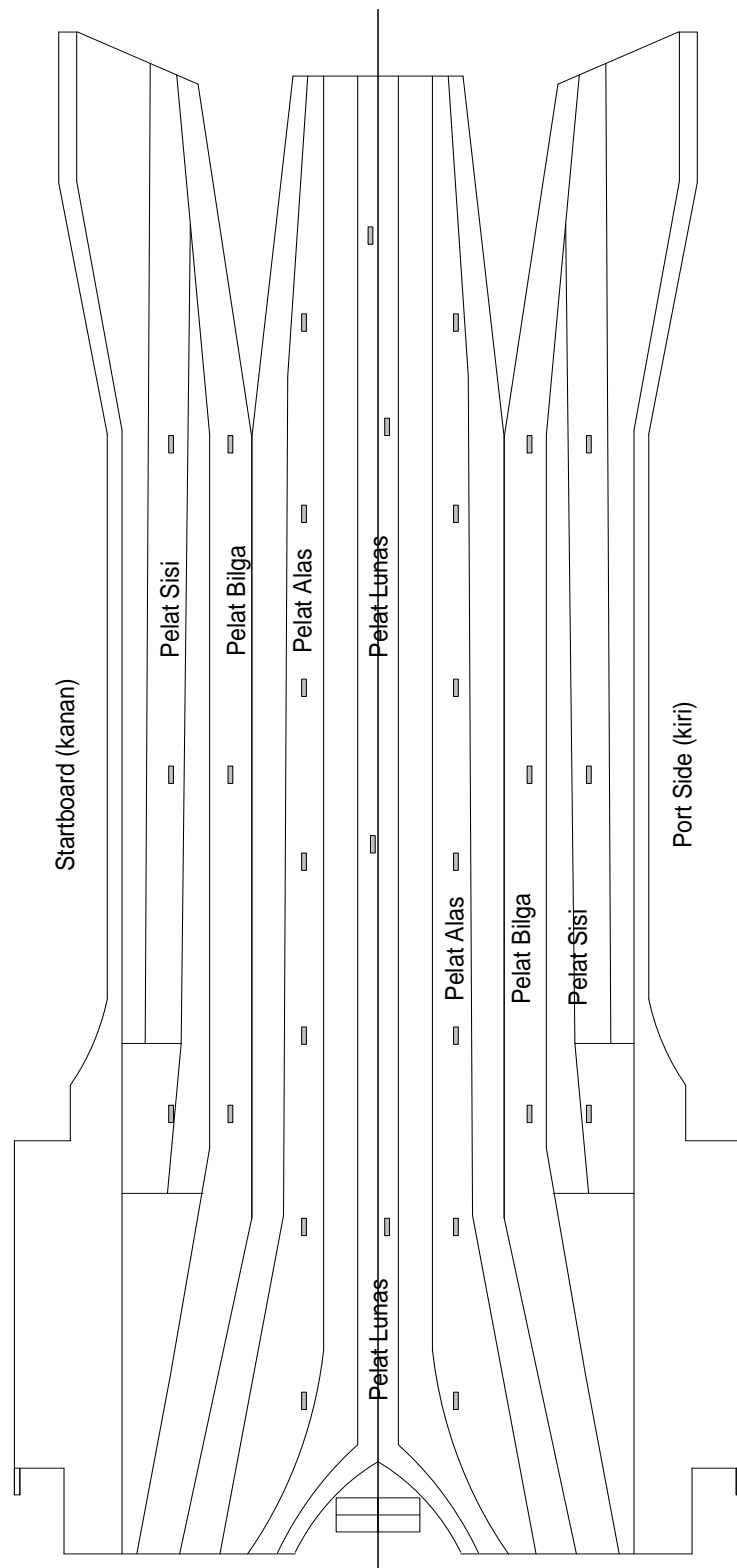
Tabel.4.8. jarak penempatan anoda korban yang dipasang.

No.	Bagian lambung kapal	Jarak (m)
1	Pelat lajur lunas	17,20
2	Pelat lajur alas kanan	8,60
3	Pelat lajur alas kiri	8,60
4	Pelat lajur bilga kanan	17,20
5	Pelat lajur bilga kiri	17,20
6	Pelat lajur sisi kanan	17,20
7	Pelat lajur sisi kiri	17,20

Posisi penempatan anoda korban pada lajur pelat lambung kapal dapat dilihat dalam Gambar.4.10 dan Gambar.4.11. berikut.

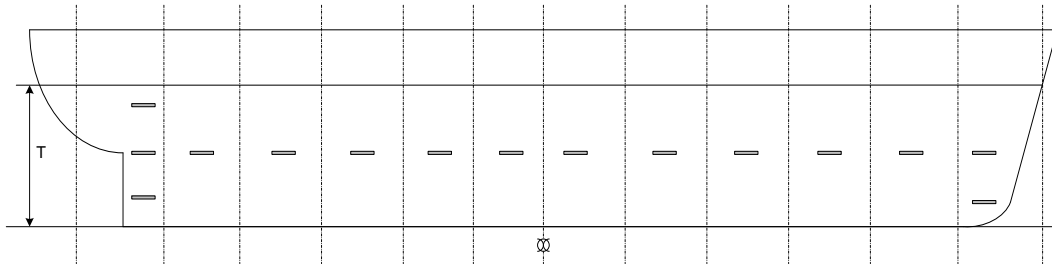


Gambar.4.10. Pandangan samping posisi anoda korban pada lajur pelat lambung kapal sesuai perhitungan.



Gambar.4.11. Pandangan atas posisi anoda korban pada lajur pelat lambung kapal sesuai perhitungan.

Posisi penempatan anoda korban yang dilakukan oleh pihak galangan kapal saat kapal naik dok dapat dilihat dalam Gambar.4.12, sebagai berikut.



Gambar.4.12. Posisi penempatan anoda korban pada pelat lambung kapal yang sesungguhnya.

4.2. Data dan Analisa Eksperimen Laboratorium

4.2.1. Hasil Perhitungan Kebutuhan Anoda Korban

a. Berat Anoda Korban untuk Pengujian Korosi

Berat anoda korban yang dibutuhkan untuk uji celup dapat dihitung berdasarkan spesimen uji berupa pelat baja yang tercelup dalam bak air laut dengan ukuran (120,0 mm x 40,0 mm x 11,0 mm) dan luasan $126,4360 \text{ cm}^2 = 0,0126 \text{ m}^2$, dengan rumus berikut ; (Espelid, 1996)

$$M = \frac{I_c \times T \times 8760}{\mu \times \varepsilon} \quad (4.12)$$

dimana :

M = Berat anoda korban (kg)

I_c = Kebutuhan arus proteksi (Ampere)

T = Umur proteksi (tahun), $T = 3$ tahun (Peraturan BKI)

μ = Faktor guna anoda korban

$\mu = 0,85$ (tabel)

ε = *Electrochemical efficiency* (Ah/kg), 2000 untuk paduan aluminium

$$I_c = A_c \times f_c \times i_c \quad \dots (\text{Ampere}) \quad (4.13)$$

dimana :

A_c = Luas pelat baja yang diproteksi dengan paduan aluminium (m²)

$A_c = 126,436 \text{ cm}^2 = 0,0126436 \text{ m}^2$

f_c = faktor kerusakan lapisan (tabel)

$$f_c = k_1 + k_2 \dots \dots (Ampere) \quad (4.14)$$

dimana : $k_1 = 0,02$ (mengacu pada DNV RPB401)

$k_2 = 0,015$ (mengacu pada DNV RPB401)

t_f = umur proteksi = 3 tahun

$$f_c = k_1 + k_2 = 0,02 + 0,015 \times \frac{3}{2} = 0,0425 \dots (Ampere)$$

i_c = Arus densitas rata-rata (Ampere/m²) , $i_c = 0,100$ Ampere/m² (tabel)

$$I_c = A_c \times f_c \times i_c = 0,012644 \times 0,0425 \times 0,10 = 0,0000537 \dots (Ampere)$$

sehingga :

$$M = \frac{I_c \times T \times 8760}{\mu \times \varepsilon} = \frac{0,0000537 \times 3 \times 8760}{0,85 \times 2000} = 0,000831 \text{ kg} = 0,831 \text{ gram}$$

Berat anoda korban tersebut dipasang pada permukaan pelat baja bagian

$$\text{kiri dan kanan, sehingga } M \text{ kiri} = M \text{ kanan} = \frac{0,831}{2} = 0,4155 = 0,42 \text{ gram.}$$

Penambahan untuk tempat-tempat kritis dan untuk faktor keamanan=20%

$$\text{Jadi } M \text{ kiri} = M \text{ kanan} = 0,42 \times 1,2 = 0,506 = 0,51 \text{ gram}$$

b. Ukuran Anoda Korban untuk Uji Celup

Direncanakan dimensi anoda korban paduan aluminium (tiga macam anoda korban paduan aluminium : A, B dan C) dalam bentuk empat persegi panjang dengan ukuran panjang 20 mm, lebar 5 mm dan tebal 2,5 mm. Jadi berat awal anoda korban paduan aluminium produk A = produk B = produk C adalah :

$$W_A \text{ Kiri} = W_A \text{ Kanan} = 0,51 + 0,51 = 1,02 \text{ gram}$$

$$W_B \text{ Kiri} = W_B \text{ Kanan} = 0,51 + 0,51 = 1,02 \text{ gram}$$

$$W_C \text{ Kiri} = W_C \text{ Kanan} = 0,51 + 0,51 = 1,02 \text{ gram}$$

Anoda korban ini direkatkan ke pelat baja (spesimen uji) dengan cara dipatri/disolder dengan bantuan timah dan gondorukem.

c. Data Uji Celup

Data hasil eksperimen uji celup spesimen, diperoleh dengan menimbang tiap spesimen uji dalam jangka waktu setelah 24 jam, 48 jam, 96 jam, 144 jam, 192 jam dan 240 jam. Data pengurangan tebal dan berat spesimen dapat dilihat pada lampiran dalam Tabel.4.8 sampai dengan Tabel 4.9.

4.2.2. Hasil Perhitungan Laju Korosi

a. Perhitungan Laju Korosi Spesimen Uji

Laju korosi yang dialami oleh pelat baja (spesimen uji) dapat dihitung menggunakan persamaan berikut (Thereway, 1991).

$$Cr = \frac{K \times \Delta W_i}{A \times D \times T_i} \quad \dots \quad (4.15)$$

dimana :

Cr = Laju korosi pelat baja (mm/tahun)

K = Konstanta = $8,76 \times 10^4$.

W = Berat pelat baja yang terkorosi (gram).

$W = \Delta W_i$, selisih berat pelat baja yang terkorosi (gram).

A = Luas pelat baja yang diproteksi (cm^2).

D = Densitas pelat baja = $7,83 \text{ (gram/cm}^3\text{)}$.

T_i = Waktu ekspose (Jam).

Pelat baja sebagai spesimen uji tidak seluruh bagiannya yang dicelupkan selama proses uji celup berlangsung. Luasan spesimen uji (A, B, C dan D) yang tercelup memiliki dimensi sebagai berikut :

Panjang pelat = 12 cm

Lebar pelat = 4 cm

Tebal pelat rata-rata untuk spesimen A, B, dan C = 1,078 cm

Tebal pelat rata-rata untuk spesimen D = 1,109 cm

- Luas (A) pelat baja spesimen A, B, dan C yang diproteksi

$$\begin{aligned} A_A = A_B = A_C &= 2(12 \times 4) + 2(12 \times 1,087) + (4 \times 1,087) \\ &= 126,436 \text{ cm}^2 \end{aligned}$$

- Luas pelat baja spesimen D tanpa proteksi

$$A_D = 2(12 \times 4) + 2(12 \times 1,109) + (4 \times 1,109) = 127,052 \text{ cm}^2$$

Berat pelat baja yang terkorosi rata-rata dapat dilihat dalam Tabel.4.9 berikut ini.

Tabel.4.9. Selisih berat rata-rata spesimen: A,B,C dan D hari ke 0 s/d 10

Berat Hari ke	ΔA_{WR} (gram)	ΔB_{WR} (gram)	ΔC_{WR} (gram)	ΔD_{WR} (gram)
0	0,000	0,000	0,000	0,000
1	0,050	0,047	0,027	0,070
2	0,020	0,027	0,013	0,043
4	0,060	0,017	0,017	0,050
6	0,017	0,027	0,033	0,030
8	0,043	0,060	0,033	0,020
10	0,050	0,062	0,047	0,127

Laju korosi masing-masing spesimen A, B, C dan D dapat dihitung menggunakan persamaan 4.15. di atas dengan lama pencelupan atau waktu ekspose setiap 24jam, 48 jam, 96 jam, 144 jam, 192 jam dan 240 jam, contoh perhitungan adalah sebagai berikut:

Untuk spesimen A dengan waktu pencelupan 24 jam:

$$Cr = \frac{K \times \Delta W_i}{A \times D \times T_i} = \frac{8,76 \cdot 10^4 \times 0,050 \text{ gr}}{126,436 \text{ cm}^2 \times 7,83 \text{ gr/cm}^3 \times 24 \text{ jam}} \dots (\text{mm/tahun})$$

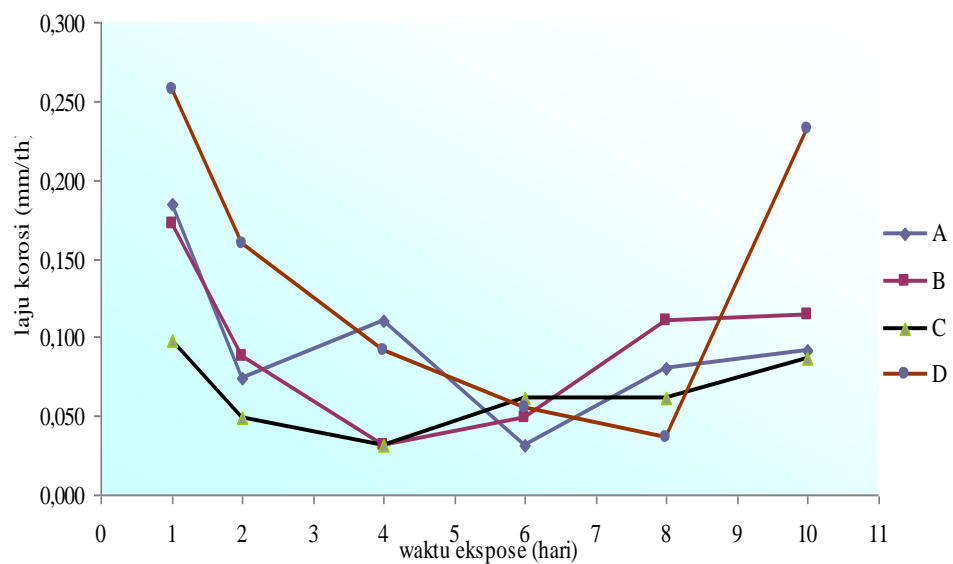
$$Cr = 0,184344573 (\text{mm/tahun})$$

$$Cr = 0,184 (\text{mm/tahun})$$

Laju korosi spesimen pelat baja A, B, C dan D dapat dilihat pada Tabel.4.10. Perbandingan laju korosi dan fenomena masing-masing spesimen dapat dilihat dalam grafik Gambar.4.13, berikut :

Tabel.4.10. Laju korosi spesimen uji pelat baja A, B, C dan D.

Laju Korosi (Cr)	Spesimen A	Spesimen B	Spesimen C	Spesimen D
Hari ke	(mm/th)	(mm/th)	(mm/th)	(mm/th)
1	0,184	0,172	0,098	0,257
2	0,074	0,098	0,049	0,159
4	0,111	0,031	0,031	0,092
6	0,031	0,049	0,061	0,055
8	0,080	0,111	0,061	0,037
10	0,092	0,114	0,086	0,232
Rata-rata	0,095	0,096	0,065	0,139

**Gambar.4.13. Grafik perbandingan laju korosi spesimen pelat baja A, B, C , D.**

Laju korosi rata-rata spesimen C dengan perlindungan anoda korban paduan Aluminium C paling rendah (rata-rata 0,065 mm/tahun), dibandingkan dengan spesimen A (rata-rata 0,095 mm/tahun), B (rata-rata 0,096 mm/tahun), yang masing-masing dilindungi dengan anoda korban paduan Aluminium A dan B serta spesimen D (tanpa anoda korban, rata-rata 0,139 mm/tahun).

Secara umum fenomena laju korosi spesimen di hari pertama sampai hari ke dua waktu ekspose jauh lebih tinggi, dari pada waktu ekspose hari ke 4, ke 6, ke 8 dan ke 10 hal ini terjadi karena lapisan pelat baja lebih banyak melepas unsur-unsur paduan logam yang mudah terkorosi atau yang tidak tahan terhadap korosi, seperti unsur, sulfat, silikon, mangan dan fosfor, walaupun sedikit kandungannya pada baja, namun pada hari pertama waktu ekspose terjadi laju korosi yang sangat tinggi. Dengan adanya anoda korban paduan aluminium yang mempunyai kandungan indium maka laju korosi spesimen agak terhambat, terutama terlihat pada spesimen C dengan anoda korban yang memiliki kandungan indium, laju korosi spesimen C waktu ekspose hari ke 1, ke 2, ke 4 dan ke 10 jauh lebih rendah dibanding spesimen A, B dan D.

Laju korosi spesimen D yang tidak dilindungi dengan anoda korban pada waktu ekspose hari ke-1, ke-2 dan hari ke-10 lebih tinggi dari spesimen A, B dan C. Hal ini disebabkan permukaan spesimen D semakin melebar akibat korosi sebelumnya. Fenomena laju korosi spesimen A dan B selama waktu ekspose naik turun, hal ini disebabkan karena pengaruh perubahan pH (pH naik laju korosi turun) dan temperatur naik laju korosi naik serta pengaruh kecepatan aliran air laut.

b. Perhitungan Laju Korosi Anoda Korban

Laju korosi anoda korban paduan aluminium A, B dan C dapat dihitung menggunakan persamaan 4.20 berikut. Anoda korban berbentuk empat persegi panjang dengan ukuran panjang 20 mm, lebar 5 mm dan tebal 2,5 mm.

$$Cr_{AK} = \frac{K \times \Delta W_{AK} i}{A_{AK} \times D_{AK} \times Ti} \quad (\text{Thereway, 1991}) \quad (4.20)$$

dimana:

Cr_{AK} = Laju korosi anoda korban (mm/tahun)

K = Konstanta = $8,76 \times 10^4$

ΔW_{AK} = Pengurangan berat anoda korban (gram)

A_{AK} = Luas anoda korban = $2(2 \times 2,5) + (2 \times 0,5) + 2(2,5 \times 0,5)$
= 13,50 cm²

D_{AK} = Densitas anoda korban = 2,70 (gram/cm³)

T = Waktu ekspose (Jam)

Laju korosi dari ketiga paduan anoda korban aluminium A, B dan C dapat dilihat dalam Tabel.4.11, berikut.

Tabel.4.11. Laju korosi anoda korban paduan aluminium A, B dan C

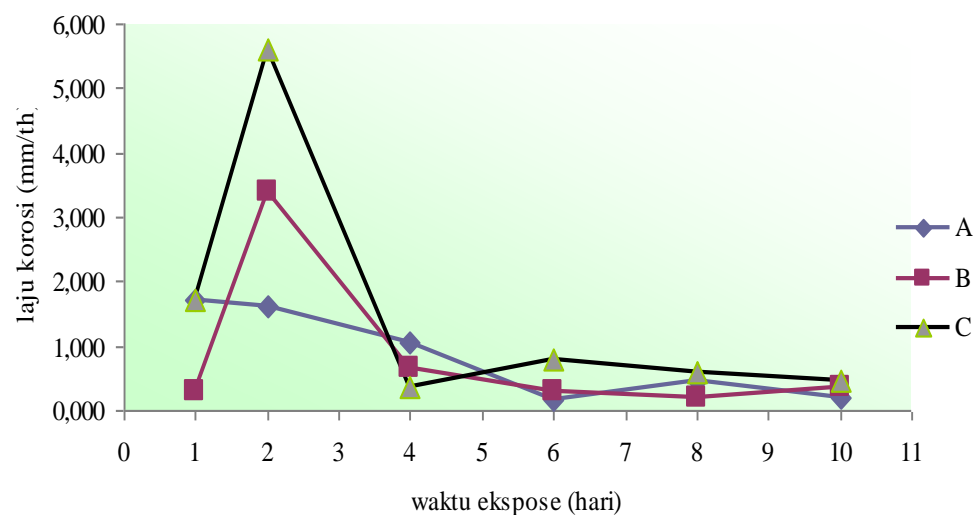
Cr_{AK}	Paduan Al A	Paduan Al B	Paduan Al C
Hari Ke	(mm/tahun)	(mm/tahun)	(mm/tahun)
1	1,702	0,300	1,702
2	1,602	3,405	5,608
4	1,051	0,651	0,350
6	0,150	0,300	0,801
8	0,451	0,200	0,601
10	0,200	0,350	0,451
Rata-rata	0,860	0,868	1,586

Laju korosi rata-rata anoda korban paduan aluminium-C paling tinggi (1,586 mm/tahun) dibandingkan dengan anoda korban paduan aluminium- A (0,860 mm/tahun) dan anoda korban paduan aluminium- B (0,868 mm/tahun). Perbandingan komposisi kimia anoda korban paduan aluminium dapat dilihat dalam Tabel.4.12. berikut.

Tabel.4.12. Perbandingan komposisi kimia anoda korban paduan aluminium (Polman, 2009 & BKI, 2004)

Anoda Korban	Persentasi Unsur (%)					
	Al	Zn	Mg	Si	Fe	In
Paduan Al-A	86,116	0,562	0,0115	0,298	1,655	0,000
Paduan Al-B	85,047	4,195	0,0115	0,255	1,786	0,000
Paduan Al-C	97,165	2,000	0,0000	0,100	0,100	0,030

Laju korosi anoda korban paduan aluminium-C tertinggi dibandingkan dengan anoda korban paduan aluminium-A dan paduan aluminium-B. Tingginya laju korosi anoda korban paduan aluminium-C karena mempunyai kandungan aluminium-97,165 % dan kandungan indium 0,03%. Sedangkan anoda korban paduan aluminium-A hanya mempunyai kandungan aluminium-86,116% tanpa kandungan indium, dan anoda korban paduan aluminium-B hanya memiliki kandungan aluminium-85,047% dan tanpa kandungan indium. Perbandingan laju korosi anoda korban dapat dilihat dalam Gambar.4.14.



Gambar.4.14. Perbandingan laju korosi anoda korban paduan Al; A, B, dan C

Secara umum laju korosi anoda korban paduan aluminium B dan C mulai hari ke-0 sampai hari ke-2 meningkat dimana paduan aluminium C sangat tajam, sedang paduan aluminium B cukup tajam, kemudian setelah hari ke-2 ada kecenderungan menurun sampai hari ke-10 waktu ekspose. Dimana pada hari ke-2 sampai hari ke-4 paduan aluminium C penurunannya sangat tajam ($C_R=5,608\text{mm/tahun}$ ke $C_R=0,350\text{ mm/tahun}$). Sedangkan anoda korban paduan aluminium B, mulai hari ke-2 sampai hari ke-10 terus menurun cukup tajam (dari $C_R=3,405\text{ mm/tahun}$ hari ke-2, sampai $C_R=0,651\text{ mm/tahun}$ hari ke-4 dan hari ke-8, $C_R=0,200\text{ mm/tahun}$) namun dihari akhir ekspose hari ke-10 laju korosinya naik $C_R=0,350\text{ mm/tahun}$. Untuk anoda korban paduan aluminium A, laju korosinya cenderung menurun, dimana di hari ke-1 $C_R=1,702\text{ mm/tahun}$, turun sampai hari ke-6 $C_R=0,150\text{ mm/tahun}$, namun laju korosinya naik lagi pada hari ke-8 $C_R=0,451\text{ mm/tahun}$ dan di hari ke-10 turun lagi $C_R=0,200\text{ mm/tahun}$.

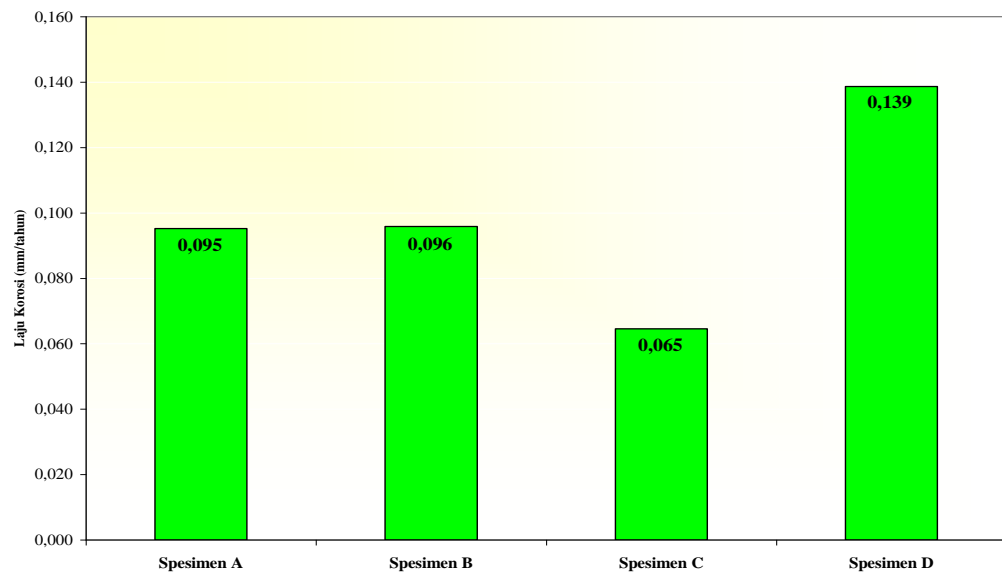
Peningkatan laju korosi pada anoda korban paduan aluminium C yang sangat tajam mulai hari ke-1 sampai hari ke-2, karena paduan aluminium C mengandung Al= 97,163% dan Indium = 0,03%. Kandungan unsur indium ini lah yang dapat meningkatkan laju korosi anoda korban aluminium C dan memperbesar hambatan laju korosi pelat baja.

Peningkatan laju korosi anoda korban paduan aluminium A dan B tidak setajam anoda korban paduan aluminium C, karena kandungan aluminium anoda korban A = 86,116% dan anoda korban B = 85,047% yaitu kurang dari 90% dan tanpa kandungan indium.

4.3.Perbandingan Hasil Eksperimen Laboratorium

4.3.1. Perbandingan Laju KorosiSpesimen Uji Pelat Baja

Perbandingan laju korosi rata-rata spesimen uji pelat baja dapat dilihat dalam Gambar.4.15 berikut ini.

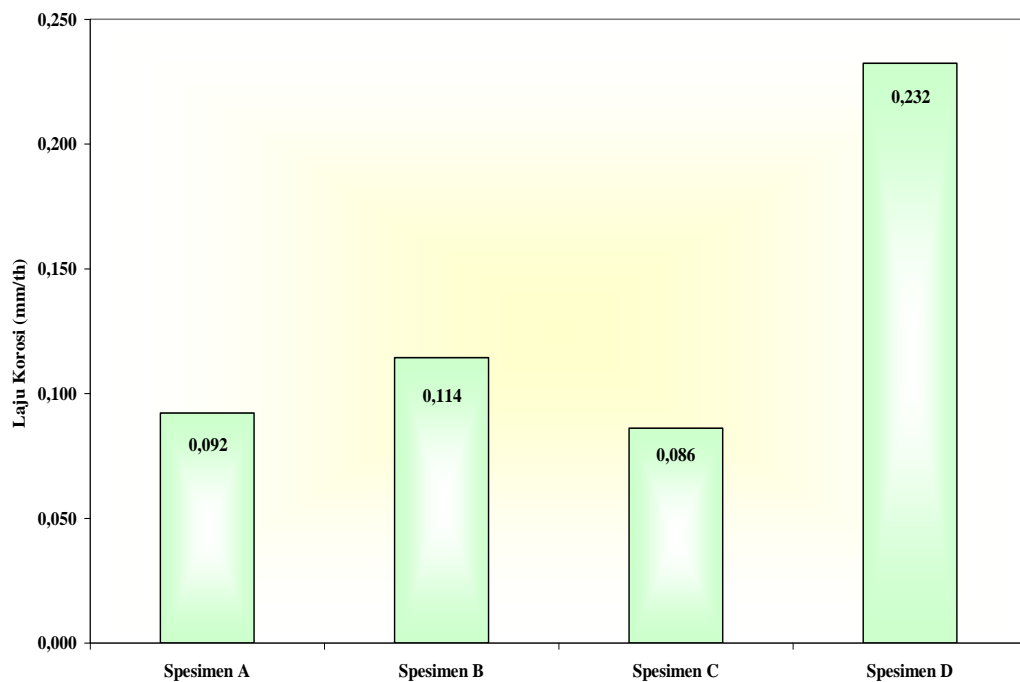


Gambar.4.15. Perbandingan laju korosi rata-rata spesimen uji pelat baja.

Dalam grafik laju korosi rata-rata tertinggi dialami oleh spesimen D, tanpa perlindungan anoda korban yaitu 0,139 mm/tahun dan laju korosi rata-rata terendah dialami oleh spesimen C yang dilindungi dengan anoda korban paduan aluminium C, yaitu 0,065 mm/tahun. Sedangkan spesimen A yang dilindungi oleh anoda korban paduan aluminium-A laju korosi rata-rata (0,095mm/tahun) dan spesimen B yang dilindungi dengan anoda korban paduan aluminium- B, laju korosi rata-ratanya (0,096 mm/tahun).

Jadi pada pelat spesimen C dengan perlindungan anoda korban paduan aluminium C, memiliki laju korosi rata-rata terendah ($C_R=0,065\text{mm/tahun}$) dibandingkan dengan spesimen A, B dan D.

Demikian juga korosi pada waktu ekspose hari ke-10 dapat dilihat dari grafik pada Gambar.4.16, berikut.



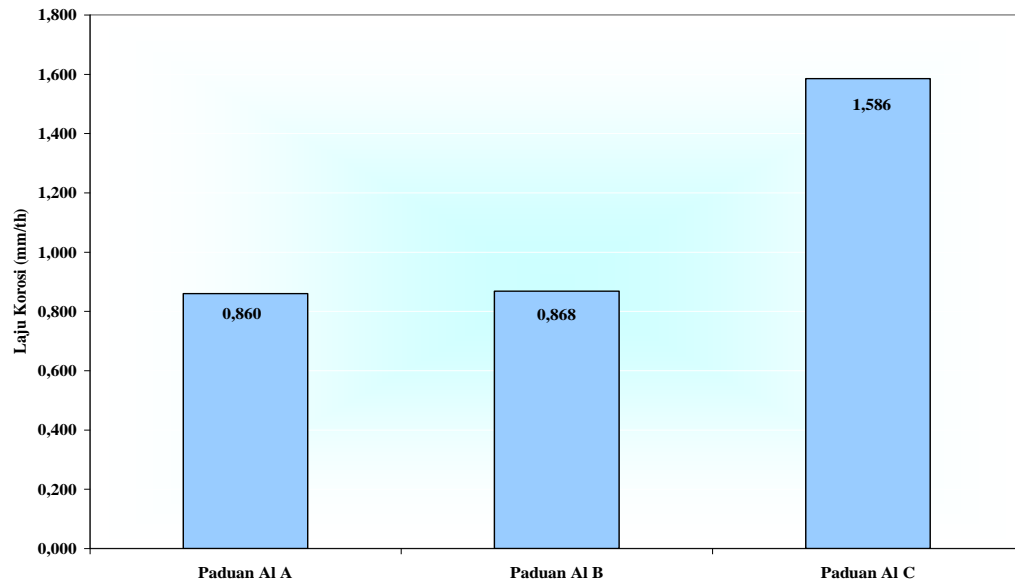
Gambar.4.16. Perbandingan laju korosi spesimen A, B, C dan D pada hari ke 10.

Pada grafik waktu ekspose hari ke 10, diatas memperlihatkan laju korosi yang terjadi pada spesimen-C paling rendah (0,086 mm/tahun) dengan perlindungan anoda korban paduan aluminium-C dibandingkan spesimen A (0,092 mm/tahun) dengan perlindungan anoda korban paduan aluminium-A dan diikuti oleh spesimen B (0,114 mm/tahun) dengan perlindungan anoda korban paduan aluminium -B serta laju korosi paling tinggi adalah spesimen D yang tanpa perlindungan anoda korban (0,232 mm/tahun).

Makin lama waktu ekspose ada kecenderungan laju korosi rata-rata akan meningkat. Pada spesimen D yang tanpa perlindungan anoda korban dengan waktu ekspose 10 hari laju korosi rata-ratanya tertinggi yaitu 0,139 mm/tahun dibandingkan laju korosi spesimen A, B dan C, serta pada hari ke-10 meningkat dengan tajam yaitu mencapai 0,232 mm/tahun

4.2.2. Perbandingan Laju Korosi Anoda Korban

Perbandingan laju korosi rata-rata anoda korban paduan aluminium dapat dilihat dalam grafik pada Gambar.4.17.



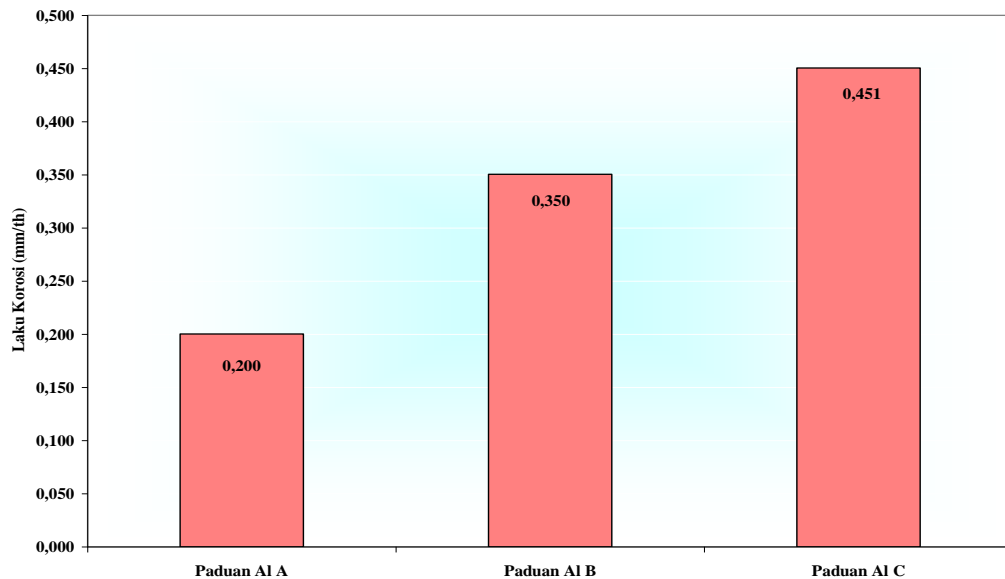
Gambar.4.17. Perbandingan laju korosi rata-rata anoda korban paduan Al; A,B, dan C.

Laju korosi rata-rata tertinggi dialami oleh anoda korban paduan aluminium-C (1,586 mm/tahun) jika dibandingkan dengan laju korosi rata-rata anoda korban paduan aluminium-A (0,860mm/tahun) dan laju korosi rata-rata anoda korban paduan aluminium-B (0,868 mm/tahun). Dengan demikian anoda korban paduan aluminium-C memiliki kinerja lebih optimal dibanding kinerja anoda korban paduan aluminium-A dan paduan aluminium-B, sehingga dapat dijadikan pilihan terbaik untuk digunakan sebagai perlindungan korosi pada pelat baja kapal.

Peningkatan laju korosi rata-rata pada anoda korban paduan aluminium C karena adanya kandungan unsur indium yang berpengaruh untuk meningkatkan laju korosi anoda korban yang tidak terdapat dalam anoda korban paduan aluminium A dan B. Sebagaimana hasil penelitian yang dilakukan oleh Tai Ming Tsai (1996) yang menyatakan bahwa

kemampuan anoda korban paduan aluminium dipengaruhi oleh penambahan unsur indium walaupun dalam jumlah yang kecil, ternyata unsur indium ini dapat meningkatkan laju korosi anoda korban paduan aluminium.

Demikian juga dari laju korosi masing-masing anoda korban paduan aluminium pada waktu ekspose hari ke-10 dapat dilihat dalam grafik pada Gambar.4.18 berikut ini.



Gambar.4.18. Laju korosi anoda korban pada hari ke 10.

Laju korosi anoda korban paduan aluminium-C (0,451 mm/tahun tertinggi, dibandingkan anoda korban paduan aluminium-A (0,200 mm/tahun) dan anoda korban paduan aluminium-B (0,350 mm/tahun). Sehingga lebih memantapkan bahwa anoda korban paduan aluminium-C yang paling baik digunakan sebagai perlindungan korosi pada pelat baja kapal.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

Dalam rangka mengetahui efektifitas penggunaan beberapa produk anoda korban paduan aluminium yang ada di pasaran sebagai perlindungan terhadap korosi pada pelat baja kapal maka dari hasil penelitian yang telah dilakukan dapat diambil kesimpulan sebagai berikut :

1. Anoda korban paduan aluminium yang dipasang pada pelat lambung kapal ternyata secara vertikal, dapat memperlambat laju korosi rata-rata sebesar 0,304 mm/tahun setelah kapal berlayar selama 3 tahun. Laju korosi tertinggi terjadi pada pelat lunas kapal , sebesar 0,650 mm/tahun, sedang laju korosi terendah terjadi pada pelat alas bagian kiri kapal sebesar 0,203 mm/tahun. Anoda korban paduan aluminium yang dipasang pada pelat lambung kapal ternyata secara longitudinal, dapat memperlambat laju korosi rata-rata sebesar 0,327 mm/tahun, setelah kapal berlayar selama 3 tahun. Laju korosi tertinggi terjadi pada pelat haluan bagian kiri kapal, sebesar 0,48 mm/tahun, sedang laju korosi terendah terjadi pada pelat tengah bagian kiri kapal sebesar 0,220 mm/tahun.

Pemasangan anoda korban paduan aluminium pada pelat lambung kapal KM ADRI XLIV, secara teknis mempunyai kinerja yang baik dan sangat berpengaruh dalam memperlambat laju korosi pelat baja kapal.

2. Laju korosi rata-rata spesimen uji pelat baja lambung kapal AISI-E 2512, dengan perlindungan anoda korban paduan aluminium A (0,095 mm/tahun), paduan aluminium B (0,096 mm/tahun), paduan aluminium C (0,065 mm/tahun), dan spesimen uji D tanpa anoda korban (0,139 mm/tahun). Dengan demikian Anoda korban paduan aluminium-C memiliki kinerja lebih baik dari anoda korban yang lain dengan laju korosi rata-rata anoda korban paduan aluminium-C (1,586 mm/tahun),

3. Sebagai rekomendasi dari hasil pengujian korosi, anoda korban paduan aluminium-C dengan komposisi kimia Al = 97,165%, Zn = 2,00%, In=0,030%, merupakan pilihan terbaik. Unsur indium dalam anoda korban paduan aluminium dapat memperlambat laju korosi pelat lambung kapal dan meningkatkan laju korosi anoda korban paduan aluminium dan dapat digunakan sebagai anoda korban untuk melindungi pelat baja kapal dari serangan korosi air laut karena mempunyai kinerja yang paling optimal dibanding produk yang lain (Produk A dan B).

5.2. Saran

Berdasarkan hasil penelitian ini anoda korban paduan aluminium-C memiliki kinerja yang optimal, dalam arti dapat memperlambat laju korosi pelat baja seminimal mungkin, dan laju korosi paduan aluminium yang maksimal, sehingga benar-benar dapat berfungsi sebagai anoda yang memang dikorbankan. Untuk itu disarankan kepada para pengguna anoda korban paduan aluminium baik pemilik kapal, pihak dok dan galangan kapal maupun produsen, sebaiknya untuk melindungi pelat lambung kapal dari korosi dapat memakai anoda korban paduan aluminium-C.

DAFTAR PUSTAKA

- American Bureau of Shipping (ABS), 2007, Guidance Notes On The Inspection, Maintenance and Application of Marine Coating System, Third Edition, ABS, USA.*
- Anggono, Juliana. Citro, Soejono. dan Palapessy, Victor Rizal, 2000, *Studi Perbandingan Kinerja Anoda Korban Paduan Aluminium dengan Paduan Seng dalam Lingkungan Air Laut*, Jurnal Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri, Universitas Kristen Petra, Surabaya, Volume 2 Nomor 1, halaman 89 – 99.
- Anonim, 2003, *Annual Book of ASTM Standards, Metal Corrosion, Erosion and Wear, Vol 03.02*, ASTM International, New York.
- Anonim, 2003, *Annual Book of ASTM Standards, Standards Practice for the Preparation of Substitute Ocean Water, Vol 11.02*, ASTM International, New York.
- Antoni, Ahmad, IKM, 1998, *Kamus Lengkap Teknik (Inggris - Indonesia)*, Gitamedia Press, Surabaya.
- Benjamin D. Craig, 2006, *Corrosion Prevention and Control: A Program Management Guide for Selecting Materials by : Advanced Materials, Manufacturing, and Testing Information Analysis Center (AMMTIAC)*.
- Caridis, P.A, B.Sc, M.Sc, Ph.D MRINA. C. Eng, 1995, *Inspection, Repair and Maintenance of Ship Structure*, Witherby & CO. LTD, London.
- DNV *Recommended Practice* RP.B401, 1993, *Cathodic Protection Design*, Det Norske Veritas Industry Norway AS, Hovik.
- Espelid, Baard, Brigith Schi, 1996, *Characterization of Sacrificial Anodes Materials Through Laboratory Testing, In NACE International, Corrosion 1996, Paper No.551*, Texas, USA.
- Fontana, Mars G, 1986, *Corrosion Engineering*, 3th Edition, Mc Graw Hill Book Co., New York.
- Japan Society of Corrosion Engineering (JSCE), 1982, *Boshoiku Gijutsu*, 31, p612.

- Kjernsmo Dag, Kjell, Kleven. and Schele, Jan, 2003, *Corrosion Protection, Inspectors Book of Reference*, Hempel A/S, Denmark.
- Orozco, R, Canto C.M., Genesca, J, Juarez Islas, J.A, 2005, *Electrochemical Characteristics of Al-Zn-Mg Alloys As Sacrificial Anode In Sea Water, In NACE International, Corrosion 2005, Paper No. 05081*, Texas, USA.
- PT. Biro Klasifikasi Indonesia, 2004, *Regulator for the Corrosion and Coating System, Edition 2004*, BKI, Jakarta .
- PT. Biro Klasifikasi Indonesia, 2006, *Rules for The Classification and Construction of Seagoing Stel Ships, Volume II, Rules For Hull, Edition 2006*, BKI, Jakarta .
- PT. Wisa Dwi Persada Prima, 2003, *Corrosion Control by Cathodic Protection*, PT. Wisa Dwi Persada Prima, Jakarta.
- PT. Veocarindo Utama, 2006, *Corrosion Control by Cathodic Protection*, PT. Veocarindo Utama, Jakarta.
- Rustandi, Andi, Johny. W. Soedarsono, 2005, *Correlation Efficiency of Sacrificial Anode Al-Zn-In Toward Movement of Polarization Curve Using Potensiodynamic Mothod, In NACE International, Corrosion 2005, Paper No. 05077*, Texas, USA.
- Sri Widartho, 2001, *Karat dan Pencegahannya*, PT. Pradnya Paramita, Jakarta.
- Tsai, Tai Ming, 1995, *Protection of Steel Using Aluminum Sacrificial Anodes in Artificial Seawater, Journal of Marine Science and Technology*, Volume 4, No.1, Tahun 1995, halaman 17 – 21.
- Trethewey, Kenneth, R, B.Sc, Ph.D, C.Chem, MRSC, MCORR.ST, John Chamberlain, 1991, *Korosi Untuk Mahasiswa Sains dan Rekayasa*, PT. Gramedia Pustaka Utama, Jakarta.
- Wiryo Sumarto, Harsono, Ir, Dr, Prof, Okumora Toshie, Dr, Prof, 1991, *Teknologi Pengelasan Logam*, PT. Pradnya Paramita, Jakarta.
- Yaumena, SH, 1985, *Cathodic Protection*, Revisi I, Modul Pelatihan, Jakarta.